



Universidad
Tecnológica
de Pereira

GESTIÓN ENERGÉTICA EN EDIFICIOS INTELIGENTES USANDO OPTIMIZACIÓN CONVEXA

Trabajo presentado como requisito parcial para optar al
título de Magister en Ingeniería Eléctrica

Por:

Daniel Alejandro Suárez Monsalve

Maestría en Ingeniería Eléctrica
Pereira, Junio de 2021

Daniel Alejandro Suárez Monsalve. (2021). *Eficiencia Energética en Edificaciones Inteligentes Usando Ciencia de Datos y Optimización Convexa*
Tesis de Maestría. Maestría en ingeniería eléctrica. Universidad Tecnológica de Pereira.

Directores

Director principal: Alejandro Garcés Ruiz.

Universidad Tecnológica de Pereira

Codirector: Juan Carlos Bedoya.

Pacific Northwest National Laboratory - PNNL. WA, USA

Universidad Tecnológica de Pereira ©

Maestría en ingeniería eléctrica

Pereira, Colombia

www.utp.edu.co

Tabla de contenido

1. Introducción	9
1.1. Definición del problema	9
1.2. Motivación	10
1.3. Metodología propuesta	12
1.4. Contribución y estructura del documento	15
2. Análisis del Contexto	17
2.1. Edificios inteligentes	17
2.2. Estado del arte internacional	18
2.3. Eficiencia energética en Colombia	25
2.3.1. Gestión eficiente de la energía en el contexto nacional . .	26
2.3.2. Consumo de energía	26
2.4. Marco normativo nacional	26
2.4.1. Ley 697 de 2001	27
2.4.2. PROURE 2010-2015	29
2.4.3. Impulso a la eficiencia energética en Colombia	29
2.5. Conclusiones preliminares acerca del contexto nacional e interna- cional	31
3. Aplicación de la Ciencia de Datos para la Gestión Energética	32
3.1. Planificación energética	32
3.2. Revisión energética	33
3.2.1. Metodología para la revisión energética	34
3.3. Metodología para la aplicación de ciencia de datos	35
3.4. Análisis de datos de la revisión energética	37
3.5. Oportunidades de mejora del desempeño energético	45
4. Modelos Matemáticos para la Mejora del Desempeño Energéti- co	50
4.1. Modelo de cargas fijas	51
4.2. Modelo de cargas desconectables	51
4.3. Modelo de cargas controlables	52

5. Caso de Estudio y Resultados	55
5.1. Modelo de cargas fijas	55
5.2. Modelo de cargas desconectables	56
5.3. Modelo de cargas controlables	58
5.4. Algoritmo para la mejora del desempeño energético	60
6. Conclusiones	62

Lista de figuras

1.1. Metodología para gestión energética usando ciencia de datos y modelos matemáticos.	14
2.1. Diagrama esquemático que muestra la arquitectura del sistema modelo de control predictivo aproximado propuesto [Yang et al., 2021].	19
2.2. Marco integrado de operaciones de mercado con participación proactiva de la demanda [Wei et al., 2016].	22
2.3. Esquema del modelo de control predictivo [Tang and Wang, 2019].	23
2.4. Porcentaje de uso de la optimización convexa, en la gestión de energía en tiempo real en edificios	24
2.5. Uso de CP por año.	25
3.1. Proceso de planificación energética.	33
3.2. Esquema de revisión energética.	34
3.3. Esquema de la metodología de la ciencia de datos.	35
3.4. Diagrama de Pareto de consumo de energía eléctrica Piso 1. . . .	39
3.5. Matriz de correlación de las variables de la revisión energética. .	40
3.6. Diagrama de Pareto de consumo de energía eléctrica Piso 2. . . .	41
3.7. Diagrama de Pareto de consumo de energía eléctrica Piso 3. . . .	41
3.8. Gráfica intensidad de consumo energético en función de potencia instalada.	42
3.9. Diagrama de Pareto de consumo de energía eléctrica Piso 4. . . .	43
3.10. Diagrama de Pareto de consumo de energía eléctrica Piso 5. . . .	43
3.11. Diagrama de Pareto de consumo de energía eléctrica Piso 6. . . .	44
3.12. Gráfica intensidad de consumo energético.	44
3.13. Diagrama de Pareto de consumo de energía eléctrica de la edificación.	45
4.1. Información de precios en tiempo real recibida de la empresa de servicios públicos	50
4.2. Temperatura exterior	53
5.1. Potencia de iluminación fluorescente VS. Potencia de iluminación LED.	55
5.2. Gráfica costos consumos energéticos cargas fijas	56

5.3.	Gráfica costos consumos energéticos cargas desconectables	57
5.4.	Curva de carga computadores de los ambientes de formación . . .	58
5.5.	Comportamiento del control de temperatura interior	59
5.6.	Gráfica costos consumos energéticos cargas controlables	60
5.7.	Gráfica costos consumos energéticos generales de la edificación .	61

Lista de Tablas

1.1. Barreras energéticas	11
2.1. Subprogramas (PROURE) [DNP, 2017]	30
3.1. Equipos de mayor consumo de energía	40
3.2. Demanda de los usos significativos de la energía eléctrica	45
3.3. Características de los usos significativos de la energía	46
3.4. Clasificación de los modelos en función de los tipos de cargas	47
3.5. Plan de acción transición tecnológica de iluminación	48

Agradecimientos

Agradezco a mi madre que desde el cielo es mi guía y mi fortaleza para seguir adelante, su sonrisa en mi mente es el motor que me impulsa a hacer las cosas bien y seguir luchando por mis sueños, agradezco también a todos los familiares y profesores que me acompañaron en todo este proceso tan importante de mi vida instruyéndome y motivándome para seguir adelante, gracias de todo corazón por todo, que Dios le brinde mucha salud y felicidad a cada uno de ellos.

Resumen

En este trabajo se propone un modelo de optimización convexa para aumentar la eficiencia energética en edificios inteligentes, ya sean de tipo industrial, comercial o residencial. El trabajo busca ser aplicado a un edificio inteligente, entendido como aquel que tiene incorporado equipamiento de uso terciario, con el objetivo de reducir el consumo de energía, aumentar el confort y la seguridad. A su vez, se pretende llevar la optimización convexa al estado del arte de la eficiencia energética, haciendo uso racional y eficiente de los recursos energéticos con métodos avanzados de optimización matemática.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Definición del problema

La eficiencia energética es una herramienta fundamental para asegurar el abastecimiento de energía, mediante tecnologías más eficientes y buenos hábitos de consumo, con el fin de optimizar el manejo y uso de los recursos energéticos disponibles y aumentar la productividad y competitividad. Esta es una de las principales estrategias de mitigación de impactos ambientales en la cadena energética [Arce et al., 2017].

La eficiencia energética se encuentra dentro de las metodologías relacionadas con la gestión de demanda o DSM por sus siglas en inglés (*demand side management*), cuyas actividades están orientadas a influir en los usuarios finales de la energía [Shaw et al., 2005], fomentando el uso racional y eficiente de la energía, con el fin de disminuir el impacto ambiental causado por la emisión de dióxido de carbono CO₂.

Actualmente en el marco normativo de eficiencia energética del país, la ley 1715 en el artículo 30, hace referencia a que el gobierno nacional y las administraciones públicas deben realizar auditorías energéticas de sus instalaciones y establecer objetivos de ahorro de energía que deben ser alcanzados a través de medidas de eficiencia energética y de adecuaciones en su infraestructura.

Un componente fundamental para reducir la demanda de energía en un edificio es la administración de energía en tiempo real, éste es de gran interés tanto en la comunidad académica como en la profesional. La gestión de energía en tiempo real en edificios busca controlar automáticamente las fuentes de energía y las cargas, con el objetivo de reducir los costos asociados al consumo de energía. Para ello, se miden parámetros en tiempo real como consumo de energía, generación de fuentes de energía renovables, temperatura ambiente y ocupación de las instalaciones [Palensky and Dietrich, 2011].

De otro lado, la optimización convexa es un campo de la optimización matemática que estudia el problema de minimizar las funciones convexas en conjuntos convexos [Boyd et al., 2004]. Este tipo de problemas de optimización tie-

ne un gran potencial de aplicación el área de gestión eficiente de los recursos energéticos y respuesta a la demanda, en donde se busca la minimización de los costos operacionales derivados del consumo de energía eléctrica. Cabe anotar que la programación lineal es un caso particular los problemas de optimización convexa, por lo que cualquier modelo lineal es convexo. La disminución del consumo energético puede ser modelado como un problema de optimización convexa mediante una función objetivo. Al representar el problema como uno de optimización convexa se busca obtener unicidad en la solución y garantizar óptimo global [Boyd et al., 2004].

El modelo de optimización propuesto tiene en cuenta varias restricciones, tales como el régimen de uso, el precio de la electricidad, la disponibilidad y los puntos fijos de confort. El objetivo es diseñar un modelo de eficiencia energética y la mejor proporción de uso de cada fuente, para reducir las emisiones de CO_2 y el costo energético de operación, sin desmejorar la sensación de confort de dichos usuarios [Attia et al., 2018]. Desde el punto de vista práctico, se buscan beneficios tanto financieros como ambientales, ya que la reducción del consumo de energía eléctrica es proporcional a la disminución de gases de efecto invernadero.

1.2. Motivación

En los últimos años, se ha registrado un aumento del 49 % en el consumo de energía y del 43 % en las emisiones de CO_2 [Pérez-Lombard et al., 2008]. Esto demuestra una correlación potencial entre estas variables. Se pronostica que cada año el consumo de energía aumentará en un 2 %, mientras que las emisiones de CO_2 aumentarán en un 1.8 % [Pérez-Lombard et al., 2008]. Las emisiones de CO_2 y otros gases de efecto invernadero en los procesos de producción de energía han contribuido en la aceleración de los efectos del cambio climático y el calentamiento global. Estos fenómenos, traen consecuencias que amenazan la supervivencia y las condiciones de vida en el planeta. Por lo tanto, esfuerzos globales se han inicializado para incentivar el consumo eficiente de energía y la reducción de emisiones.

A nivel mundial, las edificaciones representan alrededor del 40 % del requerimiento total de energía primaria y contribuyen a más del 30 % de las emisiones de CO_2 [Costa et al., 2013], lo cual hace fundamental lograr una optimización eficiente en su gestión de energía, permitiendo ahorrar grandes cantidades de energía y disminuyendo los costos asociados al consumo de ésta.

A pesar de una gran cantidad de documentos que proponen métodos nuevos y más eficientes para la gestión de la energía en edificios, la penetración de estas tecnologías en el mercado y en la vida real es muy poca, esto debido a que los mercados presentan barreras energéticas que restringen la eficiencia económica y por ello económicamente los resultados obtenidos son inferiores a los óptimos esperados [Shaw et al., 2005].

Actualmente en los textos especializados sobre eficiencia energética se menciona una amplia variedad de barreras energéticas de mercado tal como se mues-

Categoría	Barreras
Institucional	<ul style="list-style-type: none"> -Las áreas que generalmente invierten en las instalaciones y equipos no están a cargo de la facturación del servicio. -Falta de confianza en que las medidas de eficiencia energética logren significar ahorros significativos. -Falta de capacidad para operar bajo los estándares energéticos. -Procesos de participación poco eficientes. -Cultura operativa y organizacional.
Financiera	<ul style="list-style-type: none"> -Elevados costos en la inversión inicial para proyectos de conservación de la energía. -Proyectos de inversión con elevados periodos de retorno de la inversión. -Falta de interés de los bancos y otras instituciones financieras -Desconocimiento del potencial de ahorro financiero. -Falta de apalancamiento para proyectos de eficiencia energética. -Elevados costos de financiamiento.
Técnica	<ul style="list-style-type: none"> -Elevados costos de equipos para mejorar el desempeño energético. -Tecnología en etapa temprana de desarrollo. -Elevados costos indirectos.
Mercado	<ul style="list-style-type: none"> -Falta de disponibilidad de tecnología de eficiencia energética asequibles y adecuadas para las condiciones locativas. -Problemas con distribuidores de equipos y software en baja calidad en la capacitación. -Alta rentabilidad de equipos energéticamente ineficientes.
Información	<ul style="list-style-type: none"> -Falta de conocimiento en el impacto energético del régimen de uso de las instalaciones. -Falta de conciencia y culturización sobre los beneficios de la eficiencia energética. -Información no socializada correctamente.

Tabla 1.1: Barreras energéticas

tra en la tabla 1.1, es de notar que prácticamente todas ellas se hacen notorias en la mayoría de los países de Latinoamérica.

Las barreras energéticas pueden ser divididas en cinco clases: técnicas, institucionales, financieras, información, y de mercado, debido a su importancia, el análisis de las barreras es inherente a los estudios relacionados con el mercado energético, por tanto, debe realizarse antes de diseñar e implementar un determinado programa de eficiencia energética.

En los últimos años se ha podido observar un significativo interés en la sociedad para adoptar medidas de gestión eficiente de los recursos energéticos. Bajo este panorama Colombia pretende emplear un plan energético nacional ideario en el cual se contemplan cambios en el sector industrial, comercial y en otros campos de sector energético del país. Esta metodología de cambio adoptada por diferentes naciones hace referencia a una transición energética la cual está relacionado con el cambio sobre cómo se usa energía hoy en día en la

sociedad.

La transición energética se caracteriza por un uso racional y eficiente de la energía y un cambio hacia energías renovables dejando atrás el modelo energético actual, caracterizado por el uso de energías convencionales, las cuales usan como materia prima gas, crudo, carbón entre otros, generando impactos negativos en el medio ambiente mediante su procesamiento y obtención, generando una enorme resistencia y rechazo por parte de sectores ambientalistas.

Este trabajo se busca analizar la barrera técnica, centrada en el desarrollo de tecnologías que permitan hacer una gestión energética. Se buscará un desarrollo basado en optimización convexa debido a las ventajas en términos de unicidad de la solución y convergencia de los algoritmos para operación en aplicaciones reales. Por tanto, surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo usar el paradigma de la optimización convexa en los esquemas de eficiencia energética en edificios inteligentes en Colombia?

La respuesta a esta pregunta supone una investigación en dos aspectos fundamentales: modelamiento e implementación práctica. Se busca un modelo que sea lo suficiente preciso pero que al mismo tiempo pueda ser implementado en un sistema de bajo costo.

Para un modelamiento adecuado se debe tener en cuenta que las técnicas aplicadas para el diseño de los sistemas modernos de control inteligente en la industria de la energía eléctrica y sus características se consideran al definir los parámetro de confort requerido en edificios con el uso de sistemas de administración de confort y consumo de energía compuesto por múltiples agentes inteligentes que interactúan entre ellos, dicho sistema de control posee cobertura sobre todas las zonas monitorizadas del edificio y permiten brindar la mayor comodidad posible en el edificio al tiempo que reduce el consumo de energía eléctrica.

El propósito de este estudio es desarrollar un sistema de gestión de la energía eléctrica en un edificio inteligente que pueda proporcionar la mayor comodidad posible al tiempo que optimiza el valor de la factura de energía eléctrica.

1.3. Metodología propuesta

La metodología para la gestión energética inicia con un proceso de planificación energética, en el cual se obtienen los datos necesarios para caracterizar energéticamente una instalación o proceso productivo, tal como se describe en el capítulo 3

Para obtener unas salidas sistematizadas en el proceso de planificación energética se usa la metodología para la aplicación de ciencia de datos enfocándola hacia la gestión energética, de esta manera se utilizan los datos derivados de revisión energética, tal como se describe en el capítulo 3, con el fin de aplicar modelos estadístico para hacer un análisis de los comportamientos de consumo de energía eléctrica de las diferentes cargas que caracterizan la demanda de energía de una edificación inteligente, permitiendo identificar los usos significativos de la energía eléctrica, los cuales se derivan de las cargas con mayor impacto en la

demanda de energía eléctrica.

Los modelos estadístico se ejecutan en Jupyter, el cual es un entorno de trabajo interactivo que permite desarrollar código en Python, para el manejo y análisis de los datos se hace uso de la biblioteca Pandas la cual es una poderosa herramienta al trabajar conjuntamente con la biblioteca Matplotlib la cual permite generar gráficos, los cuales permiten observar las características de consumo energético de la edificación.

Una vez se identifican los usos significativos de la energía eléctrica, a través del manejo del tema de eficiencia energética, se da origen a una serie de oportunidades de mejora del desempeño energético.

Con base a las oportunidades de mejora del desempeño energético se desarrollan tres modelos, que al igual que los modelos estadísticos aplicados para la ciencia de datos, se ejecutan en Jupyter y son implementados en el lenguaje de programación de Python.

El esquema de la metodología propuesta se ilustra a continuación en la figura 1.1

Los modelos para la mejora del desempeño energético permiten realizar gestión energética sobre cada uno de los usos significativos de la energía.

El primer modelo caracteriza el demanda de energía de las cargas fijas, las cuales debido a sus características técnicas y operativas deben funcionar sin ningún tipo de restricción o control sobre ellas. En este caso se catalogan las cargas de iluminación como parte de las cargas fijas, ya que debido a las características constructivas de la edificación hay poca incidencia de luz natural, es por ello que en este modelo solo se considera para la mejora del desempeño energético una transición tecnológica en los sistemas de iluminación, pasando de tecnología fluorescente a tecnología LED.

Para la gestión energética de las cargas desconectables se plantea un segundo modelo matemático, el cual mediante la desconexión de cargas pretende disminuir los consumos residuales de energía. En este caso derivados de los computadores que operan en los diferentes ambientes de la edificación, durante las horas en que no esta programada su operación.

Finalmente se plantean un tercer modelo matemático, el cual está basado en optimización convexa para gestión energética de los sistemas de aire acondicionado, los cuales poseen un impacto significativo en la demanda de energía de la edificación, su implementación se logra con cvx el cual es un paquete en Python que permite modelar y resolver problemas de optimización convexa.

El funcionamiento de los sistemas de aire acondicionado se describirse mediante un modelo físico, más precisamente un modelo dinámico lineal el cual expresa la relación entre el consumo de energía y las condiciones térmicas del ambiente, los sistemas de aire acondicionado modifican sus parámetros de consumo, por medio de la ecuación 4.6 donde se relaciona el consumo de energía con las parámetros térmicos externos e internos. Al tratarse de un problema de optimización convexa se puede asegurar un óptimo global en la solución.

El modelo permite realizar gestión eficiente de la energía, minimizando los costos de consumo de energía eléctrica asociado a la operación de los sistemas de aire acondicionado, por medio de ajustes en la temperatura interior a la que

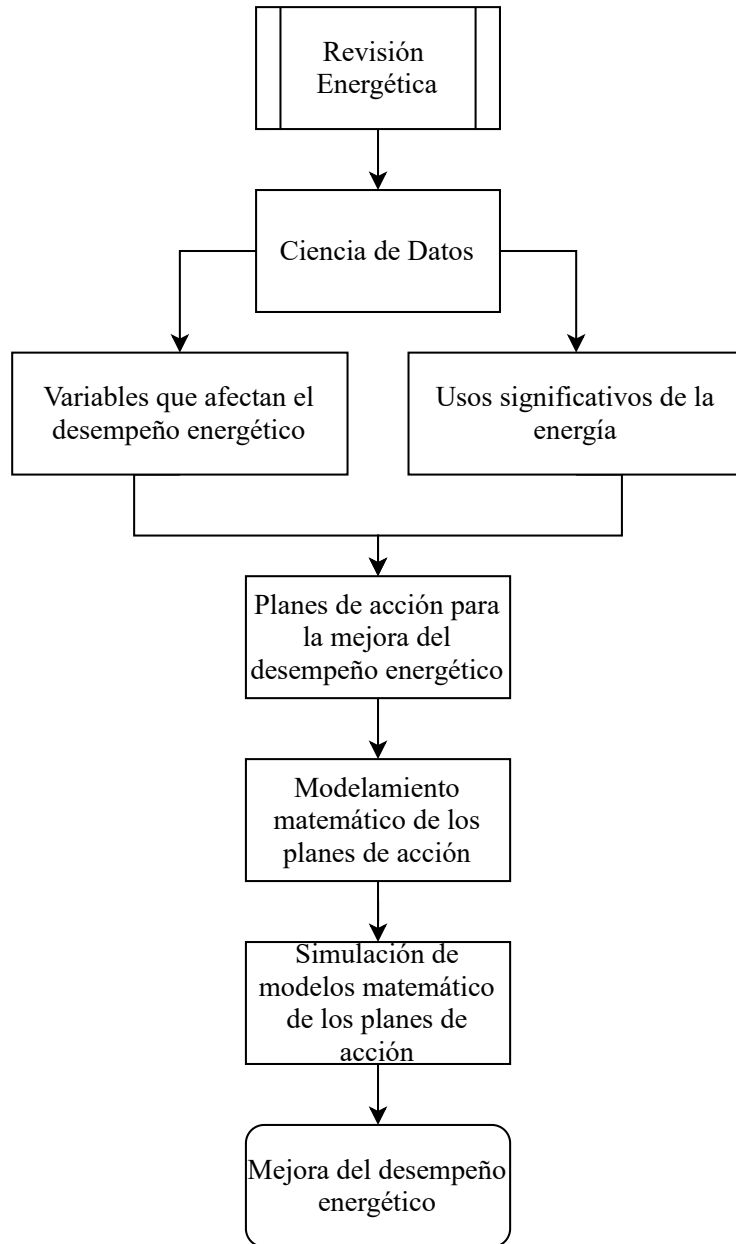


Figura 1.1: Metodología para gestión energética usando ciencia de datos y modelos matemáticos.

se programan éstos, sin desmejorar las condiciones operativas y de confort de la edificación.

1.4. Contribución y estructura del documento

Este estudio presenta cuatro contribuciones clave las cuales corresponden a cada uno de los capítulos presentados a continuación:

Análisis del contexto nacional e internacional: en el capítulo 2 se hace un análisis detallado del contexto nacional e internacional sobre la gestión energética. En el contexto internacional se hace un análisis del estado del arte sobre eficiencia energética y la metodología para desarrollar proyectos de gestión energética. En el contexto nacional se hace un análisis del entorno económico, normativo, político y social para la gestión energética desde el enfoque del uso racional y eficiente de la energía.

Aplicación de técnicas estadísticas y de ciencia de datos: en el capítulo 3 se desarrolla una metodología para enfocar la ciencia de datos en el estudio de gestión eficiente de la energía, esta metodología permite mediante modelos estadísticos desarrollados en el lenguaje Python, caracterizar energéticamente una instalación o proceso, analizar el comportamiento de las cargas, identificar posible variables que afecten el desempeño energético, los usos significativos de la energía, lo que permite identificar las oportunidades de mejora del desempeño energético. Con base en los análisis obtenidos se aplican conocimientos en eficiencia energética para diseñar los planes de acción que permiten la mejora del desempeño energético.

Modelos matemáticos para la mejora del desempeño energético: Con base en las oportunidades de mejora para el desempeño energético, las cuales están basadas en los usos significativos de la energía y las variables que afectan el desempeño energético, se plantean tres modelos matemáticos los cuales caracterizan los planes de acción.

El primer modelo detallado en 4.1, se trata sobre las cargas fijas las cuales son descritas en la tabla 3.4, estas cargas están compuestas en mayor medida por cargas pertenecientes a los sistemas de iluminación, estas cargas se catalogan como cargas fijas debido a las características constructivas de la edificación en donde se cuenta con poca iluminación natural, es debido a esto que este modelo caracteriza la transición tecnológica en iluminación para la mejora del desempeño energético.

El segundo modelo a través de la desconexión de cargas como se describe en 4.2, permite la desconexión de los computadores los cuales poseen un consumo residual de energía, lo que permite mejorar el desempeño energético haciendo gestión energética sobre uno de los usos significativos de la energía.

El tercer modelo hace gestión energética sobre las cargas controlables, tal como se describe en 4.3, optimizando el consumo de energía de los aire

acondicionados los cuales son las cargas que mayor impacto poseen sobre el consumo de energía de la edificación, este modelo hace uso de la optimización convexa para minimizar el consumo de energía y proporcionalmente sus costos asociados, gracias a la optimización convexa se puede garantizar un óptimo global en la solución sin desmejorar las condiciones operativas y de confort.

Caso de estudio: se trabaja sobre la gestión y uso racional y eficiente de la energía ya que este es un tema fundamental para el desarrollo de cualquier sociedad, en este estudio se genera una respuesta a cómo se pueden enfocar poderosas herramientas como la ciencia de datos y la optimización convexa para incrementar la eficiencia energética en las edificaciones inteligentes.

Se logra recopilar los datos de un edificio inteligente que opera en el contexto nacional, lo cual sirve como una excelente referencia para considerarlo como caso de estudio.

Finalmente se desea medir el potencial que se tiene para la mejora del desempeño energético de las edificaciones inteligentes en Colombia, a través del desarrollo y aplicación de una metodología para gestión energética usando ciencia de datos y modelos matemáticos.

Estructura del documento: este documento está estructurado de la siguiente manera: en el Capítulo 2 se presenta el análisis del contexto, en el cual se revisa el estado del arte internacional en estudios de eficiencia energética en edificaciones, además se muestra el contexto nacional e internacional sobre la gestión eficiente de la energía. En el capítulo 3 se presenta la metodología para la aplicación de la ciencia de datos enfocada a la gestión eficiente de la energía, con base en los resultados de esta metodología se identifican los usos significativos de la energía y las oportunidades de mejora del desempeño energético. En el Capítulo 4 se proponen tres modelos matemáticos, los cuales contemplan cada uno de los usos significativos de la energía y se enfocan en atenuar los costos de consumo de energía y mejorar el desempeño energético de la edificación. En el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos en el caso de estudio. Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones del estudio.

Capítulo 2

Análisis del Contexto

2.1. Edificios inteligentes

Actualmente los investigadores de gestión energética en edificaciones se han enfocado en desarrollar estrategias y tecnologías sostenibles bajo la visión de edificios inteligentes los cuales permiten responder a los requisitos de los usuarios haciendo uso racional y eficiente de los recursos energéticos. Bajo este contexto, los edificios inteligentes se encuentran diseñados para operar en función de los parámetros de referencia estándar que cumplen la mayoría de las comodidades de los ocupantes, considerando que el comportamiento de los habitantes tiene un efecto considerable sobre el consumo de energía y la huella de carbono de las edificaciones [Zanjani et al., 2015].

Es importante considerar que en los edificios comerciales, los ocupantes no tienen desarrollada una conciencia sobre las consecuencias de sus comportamientos relacionados con el consumo de la energía y no están involucrados en el control del edificio. Es por ello que los comportamientos y preferencias dinámicas de los ocupantes son los factores que se han olvidado en la operación de los Sistemas de Gestión de Energía de Edificios actuales, y frecuentemente las preferencias de los ocupantes no están alineadas con los objetivos energéticos del edificio, lo cual hace necesario culturizar al usuario final sobre los usos racionales y eficientes de la energía con el fin de modificar su comportamiento de manera que lo haga con motivación propia, lo cual es un hecho crucial para aumentar la eficiencia energética de los edificios [Rijal et al., 2009].

A medida que los gobiernos y las compañías que ofrecen servicios públicos en todo el mundo buscan reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y hacer un uso racional y eficiente de los recursos energéticos, están interesados en utilizar más tecnologías basadas en el Internet de las cosas para transformar la infraestructura energética convencional en una red inteligente interconectada. En este contexto, se plantea proponer un modelo de optimización el cual con pocos recursos financieros tenga un impacto considerable en la reducción de la factura de energía haciendo más factible el emplear un sistema de gestión

energética enfocado a la disminución de costos energéticos.

2.2. Estado del arte internacional

En esta sección, se revisan diferentes estudios relacionados con la gestión de la energía de un edificio mediante optimización matemática. La revisión se centra en los estudios de optimización de la energía en edificios. Los diferentes estudios se agrupan según la técnica de optimización convexa utilizada junto con su teoría fundamental.

Mehdi Maasoumy y Alberto Sangiovanni de la universidad de California en [Maasoumy and Sangiovanni-Vincentelli, 2012] abordan el desafío de realizar un sistema de automatización y control de edificios utilizando una red distribuida de computadoras integradas, a su vez proponen una metodología de especificación y un marco de exploración especial de diseño para elevar el nivel de abstracción en el que se diseñan los sistemas de control de edificios, para reducir el esfuerzo de diseño y para reducir el costo de implementación, en este artículo los autores consideran los algoritmos de control avanzado como habilitadores críticos para lograr un bajo consumo de energía en edificios comerciales, haciendo referencia a secciones completas de las normas de la ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*), específicamente en la norma ASHRAE 90.1, la cual establece los requisitos de eficiencia energética para el diseño, construcción, explotación y mantenimiento de edificios [of Heating et al., 1989].

Los autores en [Maasoumy and Sangiovanni-Vincentelli, 2012] modelan la dinámica térmica del clima de un edificio analizando primero la red térmica correspondiente. Cada habitación o pared se representada por un nodo en la red térmica. Haciendo una analogía con una red eléctrica, los nodos están conectados a través de resistencias y condensadores a los nodos vecinos y a la tierra, respectivamente. Los condensadores modelan la capacitancia térmica de paredes y habitaciones, y las resistencias modelan resistencias térmicas entre los nodos.

Se formula un modelo de control predictivo con el objetivo de minimizar una combinación lineal del consumo total de energía y el flujo de aire máximo, este modelo de control predictivo con función de costo es similar al usado por los autores en [Ma et al., 2009] con un modelo lineal simple. En el artículo se tiene en cuenta que el consumo de energía del ventilador es proporcional al cúbico del flujo de aire. Por lo tanto, minimizar el flujo de aire máximo reduciría drásticamente el consumo de energía del ventilador, permitiendo obtener una función de costo para el modelo de control predictivo que comprende una combinación lineal del consumo total de energía de calefacción.

En [Maasoumy and Sangiovanni-Vincentelli, 2012] los autores mediante su modelo de control predictivo logran un significativo ahorro del consumo de energía del 73,2 % con respecto al algoritmo de control convencional del edificio, lo cual permite divisar un alentador panorama en cuanto al ahorro de consumo energético derivado de los sistemas de aire acondicionado, los cuales generalmente poseen un impacto significativo en las edificaciones residenciales

y comerciales.

En [Yang et al., 2021] los autores hacen énfasis que en la actualidad los modelos de control predictivo para aplicaciones de control y automatización de edificios tiene como reto disminuir los altos requisitos de hardware y software para resolver su problema de optimización. Es por ello que en este artículo los autores plantean un modelo de control predictivo aproximado el cual imita los comportamientos dinámicos de un modelo de control predictivo utilizando una red neuronal recurrente con una estructura de red autorregresiva no lineal con entradas exógenas, este modelo aproximado se desarrolla aprendiendo de los datos obtenidos en operación de las edificaciones controladas por el modelo de control predictivo, permitiendo así obtener un control similar al modelo de control predictivo convencional para edificaciones sin necesidad de resolver el problema de optimización, reduciendo significativamente el tiempo de cómputo.

Los autores en este artículo toman dos bancos de pruebas para la implementación del modelo de control predictivo aproximado, estos bancos de prueba son dos ambientes normalmente encontrados en una edificación donde se desarrollan trabajos administrativos, una oficina y una sala de conferencias, en estos dos ambientes se busca controlar los sistemas de aire acondicionado. El estudio desarrolla inicialmente un modelo de construcción y un algoritmo de optimización para controlar la construcción del banco de pruebas durante un período de 12 horas. Los datos recopilados de operación de la edificación durante este período se emplean como datos de entrada para entrenar al modelo de control aproximado. Los datos de entrada son los parámetros de entrada del control predictivo, tales como el clima, las cargas térmicas internas y condiciones de temperatura en los ambientes. Los datos de salida incluyen el punto de ajuste de potencia de enfriamiento de los sistemas de aire acondicionado, que es el comando de control generado por el control predictivo tal como se ilustra en la figura 2.1

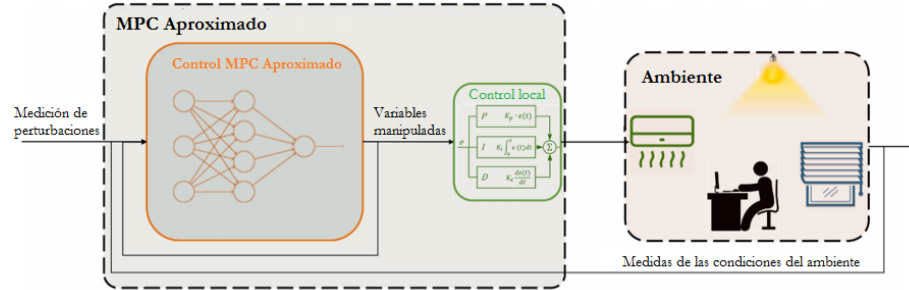


Figura 2.1: Diagrama esquemático que muestra la arquitectura del sistema modelo de control predictivo aproximado propuesto [Yang et al., 2021].

En [Yang et al., 2021] se evidenció que el rendimiento de control del modelo de control predictivo aproximado se asemeja al modelo de control predictivo convencional. El modelo de control predictivo aproximado logró obtener la ma-

yor parte del rendimiento energético y de confort térmico en ambos ambientes de pruebas, en comparación, inicialmente para la oficina, el modelo de control predictivo convencional y el aproximado lograron reducir el 58,5 % y el 51,6 % del consumo de energía de los sistemas de aire acondicionado, respectivamente. Por otro parte para la sala de conferencias, el modelo de control predictivo convencional y el aproximado obtuvieron una reducción 36,7 % y 36,2 % del consumo de energía de los sistemas de aire acondicionado, respectivamente. A su vez el modelo de control predictivo convencional y el aproximado mejoraron significativamente el confort térmico al interior en los dos ambientes de pruebas. A pesar de tener una menor degradación en el rendimiento del control, el modelo de control predictivo aproximado fue más de 100 veces más rápido que el modelo de control predictivo en generar comandos de control óptimos en cada paso de tiempo. Este estudio demostró la viabilidad de emplear un modelo de control predictivo aproximado para retener gran parte de los beneficios del modelo de control predictivo convencional, al tiempo que reduce en gran medida la velocidad de cálculo del hardware de control para la implementación.

Los autores Shi-Jie Cao y Hua-Yan Deng en [Cao and Deng, 2019] investigan de los efectos de regulación de la temperatura en el confort térmico interior, la calidad del aire y el ahorro de energía hacia edificios residenciales verdes, en donde se identifica que las regulaciones de los niveles de hermeticidad del edificio y la temperatura interior mejorarán el confort térmico y la eficiencia energética. Sin embargo, la calidad del aire interior en función de la concentración de CO_2 puede alterarse, lo que tendría un impacto negativo en la salud y la productividad de los ocupantes en los diferentes ambientes, con el propósito de disminuir dichos impactos, en este artículo se investigan los efectos de la regulación de la temperatura interior en la calidad del aire interior y el consumo de energía considerando una habitación aislada con un sistema de acondicionamiento térmico.

Inicialmente en [Cao and Deng, 2019] se realizaron experimentos con cinco temperaturas interiores y fuentes constantes de CO_2 , en las simulaciones se tuvieron en cuenta los cambios de aire por hora para determinar la tasa de cambio del aire, la cual es una forma de medir la renovación del aire en un volumen dado por unidad de tiempo. en el artículo se logra identificar que a mayor temperatura del aire suministrado los efectos negativos son más significativos con respecto a la flotabilidad térmica, esto conlleva a un aumento de los niveles de concentración de CO_2 en los ambientes. Un aumento de un grado causaría un aumento de alrededor del 1.2 % en la concentración de CO_2 junto con un 8.3 % más de consumo de energía. Además, la influencia de la temperatura interior en la dispersión de CO_2 posee un mayor impacto cuando la tasa de cambio del aire es relativamente pequeña.

Por otra parte Agnetis en [Agnetis et al., 2011] desarrolló un enfoque MILP para optimizar el funcionamiento de los dispositivos relacionados con el control de la temperatura, como el aire acondicionado o la calefacción, y el funcionamiento de una batería, en función de los parámetros de confort definidos por usuario y las señales de precios del mercado eléctrico. La optimización se refiere a minimizar el costo de la electricidad y maximizar la comodidad del usuario (nivel de temperatura). Además los autores demostraron la alta sensibilidad de

la decisión de optimización, según los parámetros de confort predefinidos por los usuarios.

En [Wei et al., 2016] los autores investigan sobre la participación proactiva de la demanda de edificios inteligentes en redes inteligentes en donde se hace referencia a que la demanda de energía puede presentar cambios en función del entorno físico dinámico, es decir, factores como la temperatura del aire exterior e interior, la radiación solar y las actividades de ocupación de la edificación. A su vez se hace referencia a que estos factores deben tener una gestión adecuada para satisfacer los requisitos de temperatura y flujo de aire del edificio.

En el artículo [Wei et al., 2016] se contempla que el efecto del volante térmico del edificio permite descargar temporalmente los sistemas *HVAC* “*Heating Ventilation Air Conditioning*” sin tener un efecto significativo en los niveles de confort de los ocupantes del edificio [Olivieri et al., 2014]. La principal contribución del artículo es formular y desarrollar un esquema de respuesta a la demanda con programación inteligente y participación proactiva de edificios inteligentes, incluyendo aspectos a nivel de programación del edificio como un modelo de dinámica térmica del edificio para caracterizar el proceso de transferencia de calor y pronosticar la evolución de la temperatura del edificio. Se desarrolla un algoritmo basado en un modelo de control predictivo para programar de forma inteligente el sistema *HVAC* minimizando el costo de la energía eléctrica.

Se ha demostrado en [Wei et al., 2014a] y [Wei et al., 2014b] que a nivel de cliente de edificios individuales, la gestión adecuada de cargas de energía flexibles, como los dispositivos *HVAC* y el almacenamiento de baterías, pueden reducir eficazmente tanto la demanda de energía máxima como el costo total de energía de los edificios. A su vez se identifica que el almacenamiento de energía de la batería puede integrarse de forma colaborativa en una formación holística para maximizar la eficiencia energética del edificio [Wei et al., 2014a].

Por otra parte en [Tang and Wang, 2019] los autores proponen un marco de operaciones de mercado integrado con la participación proactiva de la demanda de edificios inteligentes tal como se ilustra en la imagen 2.2. El marco integra la respuesta a la demanda y la optimización de la red en tres niveles de la red inteligente, clientes individuales (edificio), sistema de distribución y sistema de transmisión, a través de las interacciones de tres entidades clave de toma de decisiones, incluido el agente inteligente de programación de energía de edificios, el operador del sistema de distribución y el operador del mercado de energía eléctrica.

Además en [Tang and Wang, 2019] se estudia cómo la respuesta a la demanda puede ser empleada para realizar un uso racional y eficiente de los recursos energéticos en una edificación, permitiendo mejorar la eficiencia y el desempeño energético. Los autores abordan un enfoque poco convencional para controlar de manera óptima el almacenamiento térmico teniendo en cuenta el entorno interior de las edificaciones, desarrollando un modelo de control predictivo donde se tienen en cuenta las características de horizonte de predicción reducido, autocorrección y determinación simple de parámetros de modelos integrados, el esquema de control predictivo se ilustra en la figura 2.3, esta metodología permite optimizar la operación de un sistema central de aire acondicionado integrado

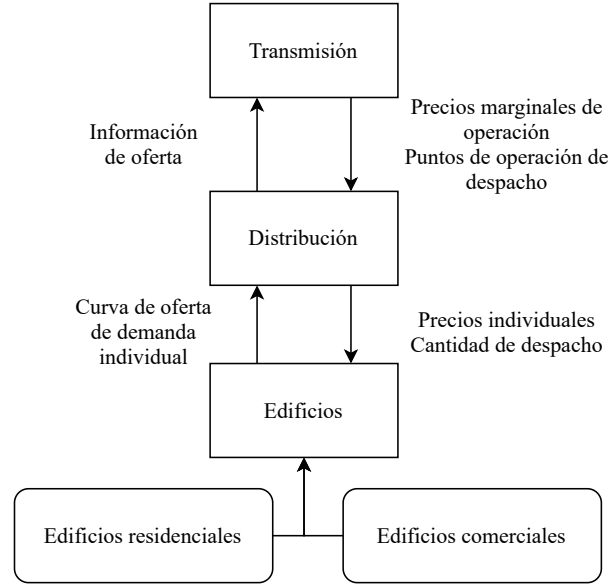


Figura 2.2: Marco integrado de operaciones de mercado con participación proactiva de la demanda [Wei et al., 2016].

con almacenamiento en térmico. La demanda de energía de la refrigeración y la velocidad de descarga de refrigeración del almacenamiento se optimizan para maximizar la reducción de consumo de energía eléctrica del edificio, sin dejar de lado la sensación de confort de los ocupantes.

De otro lado, en [Tang and Wang, 2019] se desarrollan estudios y simulaciones relacionadas con los dispositivos de aire acondicionado para probar y validar el método planteado, los resultados muestran que el modelo de control predictivo propuesto puede manejar efectivamente los controles óptimos de almacenamiento térmico durante los eventos de respuesta a la demanda para la reducción de energía eléctrica demandada y mantener ciertas condiciones de confort térmico, los autores identifican que mientras se logra la reducción de energía eléctrica, el ambiente interior mejora significativamente en los eventos de respuesta a la demanda empleando el modelo de control predictivo, y la temperatura interior máxima se reduce significativamente sin consumir energía innecesaria.

Además Tsui y Chan en [Tsui and Chan, 2012] lograron una gestión de la carga de una edificación mediante la respuesta a la demanda (*DR*). El autor plantea como objetivo principal minimizar una función objetivo que contuviera los costos operativos teniendo en cuenta el confort de cada ocupante en cada dispositivo manejable. Además, los autores propusieron una técnica de regularización para convertir el problema de programación no lineal de enteros mixtos (MINLP) a optimización convexa (*CO*), lo cual hace que el problema sea más fácil de manejar y resolver. Los autores plantean un algoritmo distribuido basado

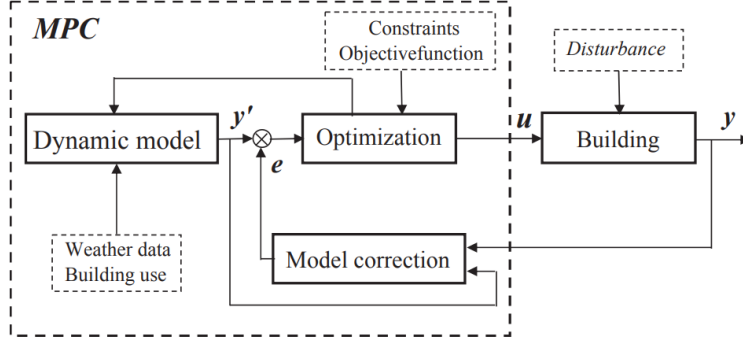


Figura 2.3: Esquema del modelo de control predictivo [Tang and Wang, 2019].

en *Constraint programming* (*CP*). Los autores bajo esta metodología evidencian que una empresa de servicios públicos y sus usuarios finales pueden cooperar con el fin de determinar el nivel de precios y el programa de demanda actualizando iterativamente la solución de sus problemas individuales, ya que para cada hogar es necesario realizar un problema de optimización convexo similar en cada iteración.

Por otra parte Michael Stadler en [Stadler et al., 2011] demostró un algoritmo basado en (*MILP*) de objetivos múltiples, con el objetivo principal de minimizar los costos totales asociados al consumo de energía eléctrica y las emisiones de CO_2 de un centro médico en California. El estudio considera tanto la demanda de energía como el almacenamiento eléctrico y térmico, los sistemas de generación de energía fotovoltaica y los precios de la energía tanto para comprar y vender energía de la red. El algoritmo abordó los costos de inversión y de funcionamiento, considerando los datos estándar de clima y perfil de carga en una base de 24 horas, lo cual es fundamental para caracterizar adecuadamente el modelo.

Por su parte en [Georgiou et al., 2019] los autores presentan algunas estadísticas derivadas, relacionadas con la optimización convexa en tiempo real en la gestión de la energía en edificios. Se evidencia que el concepto de optimización convexa actualmente no se encuentra en una etapa significativa de desarrollo, debido a la investigación en curso sobre la gestión de la energía de los edificios, el número de estudios ($n = 64$) presentados en esta revisión, constituye una muestra indicativa lo suficientemente grande. Las representaciones gráficas de los resultados obtenidos por el autor en [Georgiou et al., 2019], se ilustran en las figuras 2.4 y 2.5 .

La figura 2.4 muestra el porcentaje de participación entre las técnicas de programación utilizadas en este estudio. Como se puede observar el *MILP* predomina seguido de la programación lineal (*LP*). Esto se debe a la no continuidad del proceso de control de encendido / apagado para las diferentes fuentes de energía y sistemas de almacenamiento de energías renovables. Con el método

MILP, se evita la necesidad de estudiar la dinámica interna de cada una de las diferentes variables (*HVAC*, aparatos eléctricos, etc.) y, por lo tanto, el problema se simplifica y se vuelve mucho más fácil de manejar y resolver. Además, la *MILP* y *LP* son más empleados ya que son fáciles de manejar y resolver, donde otras técnicas como la programación cuadrática (*QP*) que pueden introducir mayor complejidad.

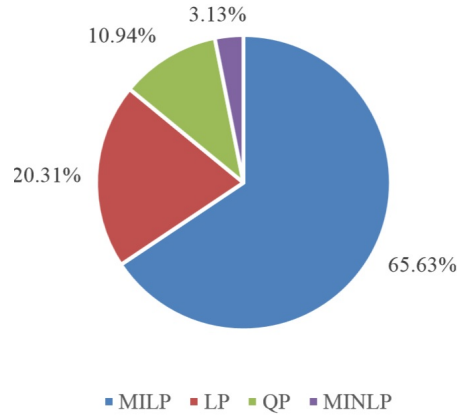


Figura 2.4: Porcentaje de uso de la optimización convexa, en la gestión de energía en tiempo real en edificios

En la figura 2.5 se ilustra la cantidad de estudios que emplearon optimización convexa, en relación con la optimización de la energía del edificio a través del almacenamiento, desde 2008. Antes de 2008, no fue posible encontrar estudios, una razón de este fenómeno puede ser debido a la ausencia de regulaciones con respecto al rendimiento de los edificios.

En el artículo [Georgiou et al., 2019] se evidencia que las herramientas de software de optimización utilizadas por cada estudio revisado, casi el 29% de ellos no empleó ninguna herramienta de software para resolver el problema de optimización. Sin embargo, la mayoría de ellos encontraron a CPLEX como su favorito, especialmente en problemas *MILP* [Amini et al., 2015].

Los autores en [Georgiou et al., 2019] concluyen que la optimización convexa es prometedora en tales escenarios, ya que garantiza soluciones globales las cuales son mejores con respecto a la reducción del consumo de energía del edificio una vez que está ocupado y se consideraron las medidas de eficiencia energética durante la fase de diseño del edificio [Costanzo et al., 2012]. Además, la gestión de la demanda también es significativa, sin embargo, éste se encuentra en función de los parámetros de confort definidos por los usuarios lo cual hace que la flexibilidad del problema sea limitada. Sin embargo, algunos estudios aumentaron la flexibilidad del problema al agregar también un dispositivo de almacenamiento al problema de gestión de la demanda permitiendo a su vez un control más eficiente [Clastres et al., 2010].

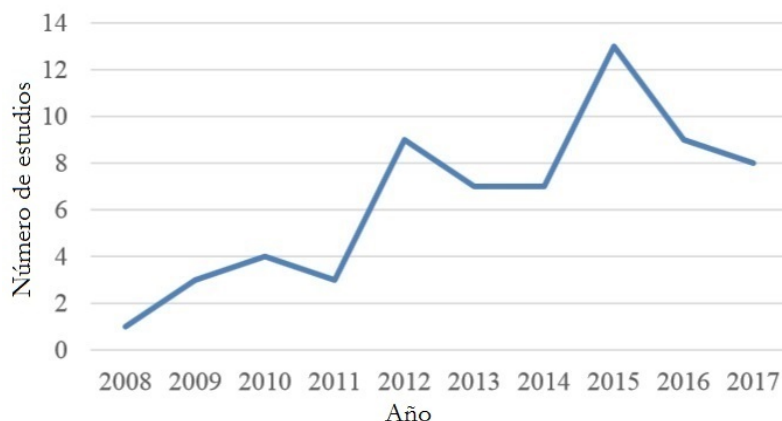


Figura 2.5: Uso de CP por año.

Nuevos esquemas para la democratización del acceso a la electricidad han sido propuestos en [Bedoya et al., 2019] y [Bedoya et al., 2020]. El primer esquema contempla un mecanismo distribuido de mercado, donde fuentes de energía renovables pueden ajustar las diferencias entre el pronóstico y la producción de energía en tiempo real. Los excedentes y déficit de energía son aprovechados por los usuarios finales para optimizar sus consumos a través de incentivos económicos derivados del mercado. Adicionalmente, para mercados descentralizados, el consumo de energía por parte de los usuarios finales y la venta de energía por parte de las fuentes de energía renovables son optimizadas individualmente a traves de un esquema de subastas simultaneas, modelos de control predictivo para la regulación de la temperatura, y minimización de riesgo de producción.

2.3. Eficiencia energética en Colombia

La eficiencia energética se define como la relación entre la energía aprovechada y la total utilizada en cualquier proceso de la cadena energética, que busca ser maximizada a través de buenas prácticas de reconversión tecnológica o sustitución de combustibles. A través de la eficiencia energética se busca obtener el mayor provecho de la energía, bien sea a partir del uso de una forma primaria de energía o durante cualquier actividad de producción, transformación, transporte, distribución y consumo de las diferentes formas de energía, dentro del marco del desarrollo sostenible [COLOMBIA, 2014].

Además la eficiencia energética permite el uso de menos energía para producir ya sea el mismo nivel de servicio o uno mejor para el usuario final, de manera económicamente eficiente y sin desmejorar el confort [Shaw et al., 2005].

Generalmente los programas basados en eficiencia energética implican una determinada inversión para modernizar una instalación existente, reemplazar equipos de baja eficiencia, o adquirir uno cuyo consumo de energía sea menor

ajustado a su operación.

En este caso la eficiencia energética estará relacionada con la gestión eficiente de los recursos energéticos, definiendo sus parámetros operativos y régimen de uso adecuado, en función de las características operativas de cada instalación, derivando en la optimización del valor de la factura de energía eléctrica y la reducción de gases de efecto invernadero (GEI).

2.3.1. Gestión eficiente de la energía en el contexto nacional

En Colombia se define la gestión eficiente de la energía mediante la Ley 1715 de 2014, como el conjunto de acciones orientadas a asegurar el suministro energético a través de la implementación de medidas de eficiencia energética y respuesta de la demanda, a su vez se define la respuesta a la demanda RD como cambios en el consumo de energía eléctrica por parte del consumidor, con respecto a un patrón usual de consumo, en respuesta a señales de precios o incentivos diseñados para inducir bajos consumos[DNP, 2017].

2.3.2. Consumo de energía

Las medidas relacionadas con el consumo de energía están enfocadas a la eficiencia energética, con las que se busca obtener la misma utilidad, pero con menos insumo energético, bien sea directamente mediante el ahorro de energía o mediante la optimización de equipos y procesos para un consumo más eficiente.

Las medidas de consumo energético son las que más se han desarrollado en el país, tanto la Ley 697/2001 como el desarrollo del programa de uso racional y eficiente de la energía (PROURE) 2010-2014 y el plan de acción indicativo de eficiencia energética (PAI) 2017-2022, identifican una serie de sectores y medidas para hacer más eficiente el consumo de energía, así como difusión para hacer un uso racional de la energía. El principal objetivo es entonces un desplazamiento de la curva de carga reduciendo el consumo del área bajo la curva.

2.4. Marco normativo nacional

La legislación y reglamentación son aspectos fundamentales en el desarrollo de acciones y estrategias desde el lado de la demanda de energía, las leyes y los decretos buscan garantizar un suministro energético eficiente, de excelente calidad y confiable.

En los últimos años con el desarrollo de nuevas tecnologías, el creciente interés en el uso racional y eficiente de la energía, en tener un suministro y un consumo energético más eficiente, la implementación de la generación distribuida residencial o industrial, la transición a vehículos eléctricos, programas de respuesta a la demanda y con el aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía por parte de los usuarios finales, en varios de estos temas los usuarios desarrollan cada vez un papel más activo, es por esto que la legislación

define acciones para permitir y facilitar la participación de los usuarios como un agente más dentro de la cadena de suministro de energía, así como desarrollar las acciones de eficiencia energética y fomentar el uso racional y eficiente de la energía en el sistema eléctrico.

2.4.1. Ley 697 de 2001

En América Latina, Colombia fue uno de los países pioneros en el desarrollo de legislación para consumo eficiente de energía, en el año 2001 fue expedida la ley 697 en donde se define que el uso racional y eficiente de energía es un asunto social, de interés público y de conveniencia nacional, fundamental para asegurar:

- El abastecimiento energético pleno y oportuno.
- La competitividad de la economía colombiana.
- La protección del consumidor.
- La promoción de fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) de manera sostenible con el medio ambiente y los recursos naturales.

Esta ley creó el marco legislativo para los desarrollos posteriores del Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía (PROURE) y los incentivos tributarios para eficiencia energética, mediante esta ley se busca fomentar el uso racional y eficiente de la energía, así como incentivar las fuentes no convencionales de energía renovables, sin embargo, desde su expedición ha sido demasiada lenta su reglamentación, debido a que una vez expedida la ley se llevó alrededor de una década en terminar de reglamentarse y en tener algún impacto práctico para el sistema, esto demuestra que una ley no necesariamente garantiza el desarrollo de una política pública con metas, acciones y responsables y cuyo impacto finalmente pueda medirse.

Se debe tener en cuenta que las políticas relacionadas con eficiencia energética y en general con el uso final de la energía, requieren de una muy buena caracterización inicial del consumo de la energía, información que en el país gestiona la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), pero sobre la cual existe un alto grado de incertidumbre.

El primer decreto reglamentario de la ley 697 de 2001 fue el decreto 3683 de 2003 que creó una Comisión Intersectorial para el Uso Racional y Eficiente de la Energía y Fuentes No Convencionales de Energía (CIURE), conformada por el Ministerio de Minas y Energía, el Ministerio de Industria y Comercio, en Ministerios de Ambiente, Vivienda y desarrollo Territorial, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) y Colciencias como miembros permanentes y la UPME como Secretaría Técnica de la comisión.

Este decreto definió la estructura institucional asignándole al Ministerio de Minas y Energía la función de la definición de políticas en eficiencia energética y el diseño de instrumentos de promoción. También definió los lineamientos

del (PROURE), así como mecanismo de apoyo a la investigación y educación, tareas de promoción y reconocimiento como la orden al mérito del uso racional de energía (URE).

Si bien este decreto asignó funciones y determinó ciertas tareas, sobre todo a nivel institucional, en la práctica tuvo muy poco impacto ya que durante 3 años no se realizaron actividades concretas ni con resultados visibles.

En el año 2006, con la expedición de la Resolución 180609 del Ministerio de Minas y Energía, se definen los subprogramas que hacen parte del programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y demás formas de energía no convencionales, (PROURE). La metodología de los subprogramas estaba enfocada en orientar la política, los incentivos e impulso a medidas efectivas, como la transición tecnológica de iluminación, sin embargo, esta metodología poseía un amplio alcance para poder desarrollarse en su totalidad. Los subprogramas creados fueron los siguientes:

- Cultura, Investigación y promoción del URE y análisis prospectivo de nuevas tecnologías de transformación energética relacionadas con el mismo.
- Fomento y desarrollo de proyectos con fuentes energéticas no convencionales y de eficiencia energética, incluidos los proyectos de energías limpias o renovables con prioridad en las zonas no interconectadas.
- Edificaciones arquitectónicas y equipamiento asociado para el URE.
- Control de pérdidas de energía.
- Cambio Climático e iniciativas de mercado de metano y secuestro y captura de carbono.
- Estímulos e incentivos a tecnologías, productos y proyectos URE o al uso total o parcial de energías no convencionales.
- Proyectos o actividades de producción más limpia y de ahorro y de eficiencia energética, que requieran equipos, elementos y maquinaria destinados a la reducción en el consumo de energía y/o eficiencia energética.
- Fomento del URE en los sectores oficial, comercial, transporte, residencial (incluida vivienda de interés social), industrial (Medianas y Pequeñas Empresas MYPIMES y Empresas de Servicios Energéticos, ESCOS).
- Sustitución de combustibles tradicionales por otros combustibles potencialmente más limpios y específicamente el fomento y utilización de los biocombustibles.
- Actualización y/o reconversión tecnológica de equipos industriales en función del URE.

2.4.2. PROURE 2010-2015

El Ministerio de Minas y Energía adopta el Plan de Acción Indicativo 2010-2015 con el objetivo de desarrollar el Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y demás Formas de Energía No Convencionales.

El objetivo general del (PROURE) es promover el Uso Racional y Eficiente de la Energía y demás Formas de Energía No Convencionales, contribuir a asegurar el abastecimiento energético pleno y oportuno, la competitividad de la economía colombiana, la protección al consumidor y la promoción del uso de energías no convencionales de manera sostenible con el ambiente y los recursos naturales. Los objetivos específicos son:

- Consolidar una cultura para el manejo sostenible y eficiente de los recursos naturales a lo largo de la cadena energética.
- Construir las condiciones económicas, técnicas, regulatorias y de información para impulsar un mercado de bienes y servicios energéticos eficientes en Colombia.
- Fortalecer las instituciones e impulsar la iniciativa empresarial de carácter privado, mixto o de capital social para el desarrollo de subprogramas y proyectos que hacen parte del (PROURE).
- Facilitar la aplicación de las normas relacionadas con incentivos, incluyendo los tributarios, que permitan impulsar el desarrollo de subprogramas y proyectos que hacen parte del (PROURE).

En la tabla 2.1 se muestra un resumen de los subprogramas estratégicos transversales y de los subprogramas prioritarios sectoriales definidos. Como se puede ver cada sector tenía una serie de subprogramas en los que se identificaban de alguna forma los usos finales prioritarios por sector.

Las falencias del (PROURE) radican en la ausencia de responsables del seguimiento y del cumplimiento de las metas y la falta de consecuencias por su incumplimiento, todo esto llevo que el (PROURE) al momento de llevarse a la práctica tuviera un bajo impacto.

2.4.3. Impulso a la eficiencia energética en Colombia

En el marco normativo nacional, el impulso de la gestión eficiente de la energía se ve plasmado en la ley 1715 de 2014, el Plan de Acción Indicativo (PAI) del PROURE[PROURE, 2016] y el Plan de Gestión Integral de Cambio climático (PGICC-2018), además de otros retos consignados en el Plan Nacional de Desarrollo y en la política de Crecimiento Verde[de Crecimiento Verde, 2018].

Además en el artículo 26 de la ley 1715 de 2014 se promociona la eficiencia energética, en desarrollo del Programa de Uso Racional y eficiente de la energía y demás formas de energía no convencionales, (PROURE), diseñado por el Ministerio de Minas y Energía.

Subprograma (PROURE)		
Residencial	Industrial	Comercial y servicios
	-Optimización del uso de la energía eléctrica para fuente motriz	
-Sustitución de bombillas Incandescentes	-Optimización del uso de calderas	-Difusión, promoción y aplicación de tecnologías y buenas prácticas en sistemas de iluminación, refrigeración y aire acondicionado
-Uso eficiente de energía en equipos de refrigeración, aire acondicionado y demás electrodomésticos	-Eficiencia en iluminación	
	-Gestión integral de la energía en la industria con énfasis en producción más limpia	-Diseño, construcción, reconversión energética y uso eficiente y sostenible de edificaciones
-Hornillas eficientes		
-Diseño, construcción y uso eficiente y sostenible de viviendas	-Cogeneración y autogeneración	-Caracterización, gestión de indicadores y asistencia técnica
	-Uso racional y eficiente de la energía en PYMES	
-Gas licuado del petróleo en el sector rural	-Optimización de procesos de combustión	-Actualización o reconversión tecnológica del alumbrado público
	-Optimización de la cadena en frío	

Tabla 2.1: Subprogramas (PROURE) [DNP, 2017]

Según lo dispuesto en la Ley 697 de 2001, el Plan de Acción Indicativo 2010-2015 para desarrollar el (PROURE) adoptado por el Ministerio de Minas y Energía a través de la resolución 18-0919 de 2010, y en cumplimiento de las finalidades y principios establecidos en la presente ley, el Ministerio de Minas y Energía debe desarrollar una serie de instrumentos técnicos, jurídicos, económicos, financieros, de planificación y de información, entre los que tiene en su alcance:

- Plan de acción indicativo para el desarrollo del (PROURE).
- Reglamentaciones técnicas.
- Sistemas de etiquetado e información al consumidor sobre la eficiencia energética de los procesos, instalaciones y productos y sobre el consumo energético de los productos manufacturados.
- Campañas de información y concientización.

El plan de acción indicativo para el desarrollo del (PROURE) tiene como objetivo servir para la concreción de las actuaciones en esta materia, el establecimiento de plazos para la ejecución de las mismas, atribución de responsabilidades en el ámbito de las Entidades Públicas, y la identificación de las diferentes formas de financiación y necesidades presupuestarias [Colombia, 2017].

2.5. Conclusiones preliminares acerca del contexto nacional e internacional

En la actualidad el consumo de energía está siendo transformado por diversos factores de tipo político, social, técnico y económico, los cuales a su vez cambian la perspectiva sobre la producción y el abastecimiento de la energía.

En Colombia se ha fomentado la eficiencia energética a través de diferentes mecanismos políticos, sociales y culturales, los cuales permitirían al país mejorar su desempeño energético, economía y atenuar el impacto medio ambiental, la mejora en dichos aspectos implícitamente repercute positivamente en la calidad de vida de los colombianos.

A pesar de los diferentes mecanismos para el desarrollo de la eficiencia energética, el desarrollo de la eficiencia energética en el país es relativamente muy bajo, esto se debe a la gran cantidad de barreras energéticas que restringen la eficiencia económica e implícitamente los proyectos de eficiencia energética, es por ello por lo que los resultados obtenidos son inferiores a los deseados.

En el país actualmente no se ha conseguido un avance significativo en los estudios académicos derivados de proyectos de eficiencia energética, sin embargo, para alcanzar la transición energética es necesario cosechar el capital intelectual, el cual permitiría impulsar la gestión eficiente de la energía en el país y alcanzar los objetivos energéticos a mediano y largo plazo.

En el plano internacional la creciente preocupación por preservar el medio ambiente, debido a las consecuencias ambientales, económicas y sociales del cambio climático, cambian la perspectiva sobre la forma de usar la energía. Es por esto por lo que internacionalmente se ha comenzado a analizar detalladamente los diversos usos de la energía, así como las causas que inciden en él, lo cual resulta fundamental para alcanzar una evolución de la estructura energética general.

Por otro lado internacionalmente se han logrado significativos avances en los usos racionales y eficientes de la energía a través no solo de políticas sino también de estudios académicos, estructuración y aplicación de normas técnicas, lo cual permite integrar objetivos y trazar el camino para alcanzar en el contexto internacional el uso racional y eficiente de todos los recursos energéticos.

En el contexto nacional e internacional para aplicar una adecuada eficiencia energética en edificios también existen múltiples barreras, las cuales se pueden resumir como la diferencia entre las medidas de eficiencia energética disponibles, y las que realmente se implementan, es por esto por lo que estas barreras dificultan realizar acciones e inversiones sobre las construcciones para que sean energéticamente eficientes, a pesar de esto se pueden obtener considerables beneficios económicos, sociales y ambientales para las ciudades que logren un crecimiento sostenible por medio de esta ruta.

Capítulo 3

Aplicación de la Ciencia de Datos para la Gestión Energética

3.1. Planificación energética

Esta parte del estudio se encuentra enfocada en la caracterización energética de una edificación donde se prestan servicios académicos. Esta edificación se caracteriza por dos tipos de ambientes, el ambiente de aprendizaje y el administrativo. A su vez, cada uno de ellos se caracteriza por el régimen operativo de equipos ofimáticas, sistemas de aire acondicionado, sistemas de iluminación y equipos de refrigeración.

Para caracterizar energéticamente la edificación se debe realizar un proceso de planificación energética tal como se ilustra en la figura 3.1 donde las entradas de la revisión energética son las variables que afectan el desempeño energético, tales como, el régimen operativo de las instalaciones, cantidad de personas que hacen uso de las instalaciones, eficiencia de los equipos, entre otras.

Como parte fundamental de la caracterización energética se deben tener en cuenta los usos de la energía pasados y presentes, es decir, los datos operativos y de facturación de consumos energéticos de la edificación por parte del prestador del servicio, los cuales permiten establecer una línea base de consumo energético real la cual servirá como un indicador para comparar los resultados obtenidos en el censo de carga de la revisión energética, permitiendo así identificar la relación entre la demanda energética facturada y la estimada.

El proceso medular de la planificación energética es la revisión energética, la cual genera un inventario de todas las cargas y procesos productivos en las instalaciones definiendo las actividades de consumo energético significativas, se puede intuir que la categorización lógica de “significancia” sería según el mayor o menor consumo que tenga cada indicador.

Una correcta valoración es muy importante para el éxito del proceso de planificación energética el cual tiene como salida objetivos, metas y planes de acción para la mejora del desempeño energético.

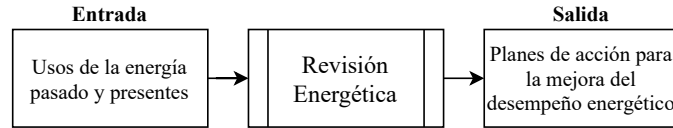


Figura 3.1: Proceso de planificación energética.

3.2. Revisión energética

La revisión energética es un proceso de desarrollo y análisis del perfil energético que da soporte a la planificación energética, donde se contempla el análisis de los consumos de energía provenientes de las diferentes fuentes, con el fin de comprender si está funcionando adecuadamente y en qué áreas de los procesos se concentra los usos significativos de energía. La revisión energética por medio de un conjunto de actividades permite analizar el desempeño energético de una determinada organización, es decir, los resultados cuantificables relacionados con eficiencia energética, usos y consumos de la energía.

El proceso de revisión energética está orientado a la identificación de usos significativos de la energía eléctrica que impactan el desempeño energético y a formular oportunidades de mejora para el desempeño energético, su metodología se basa en el análisis de datos energéticos y productivos, tales como consumos energéticos, registros productivos y características de los equipos. En este caso la aplicación de la ciencia de datos es una poderosa herramienta para analizar el uso y el consumo de la energía, identificar los usos significativos de la energía y las oportunidades de mejora del desempeño energético.

Uno de los requisitos de la revisión energética es conocer la situación inicial de las cargas que constituyen la demanda de la edificación y la forma en que se aborda la gestión de la energía en el desempeño energético, ya que de ello dependerá en gran medida la revisión energética.

En la metodología empleada en el proceso de revisión energética se realiza el inventario de cada equipo de consumo de energía eléctrica, y de este se identifica la potencia nominal, dato de eficiencia energética, tecnología, horas promedio de uso al día, este inventario es comúnmente llamado censo de carga, en éste los equipos los cuales mediante la revisión no se identifican sus datos de placa se condensan los datos hallados en los diferentes catálogos dispuestos por las áreas de sistemas y mantenimiento locativo.

El censo de carga es un insumo para la elaboración de diagramas de Pareto que permiten determinar el 20 % de los equipos y áreas que consumen aproximadamente el 80 % de la energía utilizada en las instalaciones de la edificación.

En la figura 3.2 se ilustra el esquema que muestra el proceso de la revisión energética

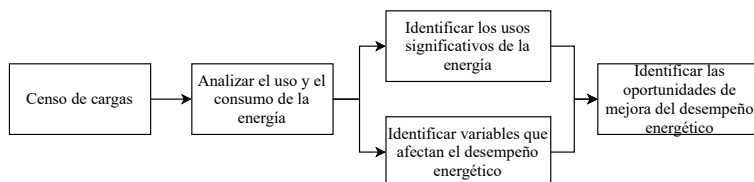


Figura 3.2: Esquema de revisión energética.

En el proceso de revisión energética se entienden los usos significativos de energía como aquéllos que tienen un consumo sustancial de energía y que ofrecen un alto potencial de mejora en el desempeño energético, estos permiten identificar las instalaciones y procesos productivos en los cuales se debe focalizar la gestión energética, lo más común es identificar los usos significativos de energía, basado en aquéllos que tienen la mayor porción del consumo de energía o bien, en términos de costo [Omar Prias, 2013].

Con base en los resultados de la revisión energética se define el marco de referencia para el planteamiento de objetivos y metas energéticas, ya que caracteriza el estado de la edificación a nivel energético, permitiendo identificar potenciales de ahorro y oportunidades de mejora en las instalaciones y procesos administrativos, enfocándose siempre en la mejora del desempeño energético.

3.2.1. Metodología para la revisión energética

La metodología empleada en la etapa de trabajo de campo de la Revisión Energética se describe a continuación:

- Visita diagnóstica por parte del consultor de eficiencia energética.
- Entrevista con encargado de la instalación.
- Inventario de equipos consumidores de energía eléctrica e identificación de equipos macro consumidores.
- Levantamiento de información concerniente al régimen de usos de los equipos consumidores de energía eléctrica.
- Obtención de variables eléctricas que permitan el análisis de los usos y consumos.
- Descripción de las principales fuentes de consumo de energía eléctrica y presentación de oportunidades de reducción de los consumos energéticos.
- Recomendaciones asociadas al uso de los diferentes sistemas que emplean energía eléctrica como insumo principal (iluminación, refrigeración, motores eléctricos, entre otros).

3.3. Metodología para la aplicación de ciencia de datos

El análisis de datos es una de las principales alternativas para resolver problemas en diversos sectores, uno de ellos es el consumo energético en edificaciones, ya que estos se caracterizan por múltiples cargas las cuales demandan energía en función de diferentes rangos operativos y características técnicas, si se consideran todos los factores que caracterizan energéticamente una edificación, se cuenta con una suficiente materia prima para la aplicación de ciencia de datos enfocados a la gestión energética.

La ciencia de datos, al igual que en otros campos, necesita un marco de referencia que sirva como estrategia para resolver problemas, la metodología para la ciencia de datos a la hora de definir una solución es un marco iterativo de métodos y procesos secuenciales que ayudan a definir correctamente una solución basada en analítica de datos.

La metodología de ciencia de datos consta de 10 etapas, tal como se ilustra en la figura 3.3 la cual muestra el esquema original de John Rollins. Estas etapas están orientadas a responder 10 preguntas fundamentales para todo proyecto de analítica de datos.

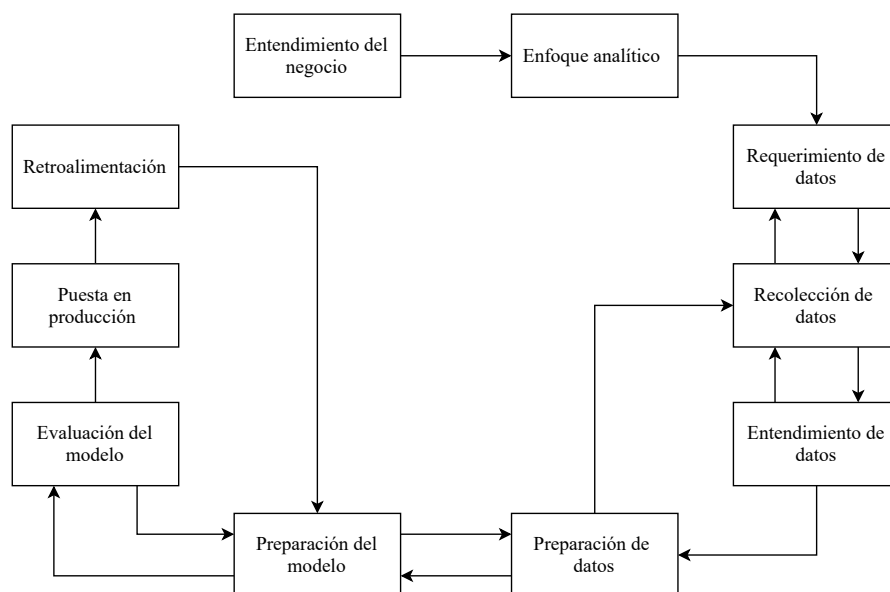


Figura 3.3: Esquema de la metodología de la ciencia de datos.

- Etapa 1: Entendimiento del negocio
¿Qué problema se quiere resolver?

- Etapa 2: Enfoque analítico
¿Cómo se puede usar datos para resolver la pregunta?
- Etapa 3: Requerimiento de datos
¿Qué datos se necesitan para resolver la pregunta?
- Etapa 4: Recolección de datos
¿De dónde vienen los datos y cómo obtenerlos?
- Etapa 5: Entendimiento de datos
¿Son los datos recolectados lo suficientemente representativos para resolver el problema?
- Etapa 6: Preparación de datos
¿Qué trabajo se requiere para extraer y manipular los datos?
- Etapa 7: Preparación del modelo
¿Cómo se pueden visualizar los datos para obtener la respuesta esperada?
- Etapa 8: Evaluación del modelo
¿El modelo inicial resuelve la pregunta inicial o necesita ser ajustado?
- Etapa 9: Puesta en producción
¿Se puede usar el modelo?
- Etapa 10: Retroalimentación
¿Se puede obtener retroalimentación para responder la pregunta inicial?

En el caso de la eficiencia energética aplicada a la ciencia de datos la respuesta a la etapa 1 requiere buscar una mejora del desempeño energético de una instalación o proceso.

Para la etapa 2 se pueden usar los datos que caracterizan el consumo energético de las diferentes cargas para identificar las oportunidades de mejora y diseñar planes de acción para la mejora del desempeño energético.

En la etapa 3 se necesitan todos los datos relacionados con las características técnicas y operativas de las cargas, además de todas las variables que influyen en la demanda de energía.

En la etapa 4 en este caso los datos se derivan de una instalación o proceso y se obtienen mediante un censo de carga el cual se estructura mediante un proceso de revisión energética.

En la etapa 5 para obtener una respuesta positiva, se hace necesario obtener la totalidad de datos que caractericen el consumo energético de cada una de las cargas e identificar el mayor número de variables que influyan en la demanda de energía, lo que permitiría representar de manera adecuada la energía de una instalación o proceso.

Para la preparación de los datos en la etapa 6, se requiere extraer los datos manualmente en un formato de Excel, detallando por piso y proceso productivo, las características técnicas y operativas para cada una de las cargas en el horizonte de tiempo planeado. Posteriormente para manipular los datos, se hace uso

de la biblioteca Pandas la cual es una poderosa herramienta para manipulación y análisis de datos en el lenguaje de programación Python.

Para la etapa 7, en este caso mediante el lenguaje de programación de Python se ordenan los datos para hacer un análisis preliminar de la estructura y componentes de la base de datos, después se crean diferentes modelos estadísticos que permitan identificar el comportamiento de las cargas, correlaciones entre los parámetros extraídos en el proceso de revisión energética y cualquier otro tipo de comportamiento que tenga un impacto significativo sobre la demanda de energía.

Para la visualización de los resultados de los modelos se hace uso de Matplotlib la cual es una biblioteca para la generación de gráficos a partir de datos contenidos en listas o arreglos.

Para la etapa 8 sobre la evaluación del modelo, con base a los resultados visualizados en los modelos estadísticos, lo fundamental es identificar los usos significativos de la energía, de esta manera se puede dar la respuesta hacia donde se deben enfocar los planes de acción para obtener una mejora considerable del desempeño energético.

Una vez que el modelo entrega exitosamente los resultados para la correcta identificación de los usos significativos de la energía, éste puede ser aplicado sin necesidad de retroalimentación.

De esta manera se da un enfoque de gestión energética a la metodología para la aplicación de ciencia de datos.

3.4. Análisis de datos de la revisión energética

Inicialmente se evidenció que la edificación del caso de estudio presenta un elevado costo en la facturación de la energía eléctrica debido a la gran demanda derivada de la cantidad de cargas asociadas y su régimen operativo, lo cual hace relevante una revisión energética que permita determinar el desempeño energético de la edificación basado en datos y otro tipo de información, orientadas a la identificación de oportunidades de mejora del desempeño energético,

Las oportunidades de mejora están enfocadas en obtener mejoras en el desempeño energético y disminuir los costos de la facturación de energía eléctrica derivados de los procesos productivos e instalaciones, va de la mano con los objetivos ambientales de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, considerando el factor de emisión kilogramos de CO_2 /kWh.

En el edificio se encuentran dos tipos de ambientes, el ambiente de aprendizaje donde se realizan actividades de tipo académicas y formativas, haciendo referencia a modalidades presenciales, virtuales e híbridas, el otro es el ambiente administrativo en donde se desarrollan las actividades para gestionar todos los recursos que están implicados en la estructura de la institución y por ende en su mantenimiento y operación. En el edificio según los resultados de la revisión energética, se pueden encontrar los siguientes tipos de cargas:

- Iluminación

- Sistemas HVAC
- Equipos Ofimáticos
- Motores Eléctricos
- Sistemas Refrigeración

Las cargas de iluminación se encuentran caracterizadas por tecnología en mayor medida fluorescente y en menor medida por tecnología LED, lo cual es un indicador de que el parque de iluminación opera con equipos de baja eficiencia energética, pues su eficacia luminosa es mucho menor que las lámparas que operan con tecnología LED que podemos encontrar comercialmente, donde la eficacia luminosa, se entiende como el flujo luminoso emitido por la fuente o lámpara (lm) respecto al consumo propio de la fuente (W).

Las cargas asociadas a los dispositivos de aire acondicionado donde su metodología es lograr mejorar el confort en los interiores de la edificación, se caracterizan por sistemas de aire acondicionado los cuales son en mayor parte constituidos por tecnología convencional.

En los dispositivos de aire acondicionado se debe tener en cuenta conceptos secundarios, pero totalmente arraigados a la climatización, los principales serían la temperatura interior deseada conocida también como la temperatura de *set-point*, y las condiciones de aislamiento térmico de los ambientes al momento de operar dichos equipos, esto debido a que estos parámetros tienen un impacto en el consumo energético.

Como resultado de la revisión energética del primer piso de la edificación se evidenció tal y como se ilustra en el diagrama de Pareto de la figura 3.4, el cual permite identificar los usos significativos de la energía de piso número 1, donde el mayor impacto en el consumo energético proviene de los sistemas de aire acondicionado, esto debido a que este piso cuenta con una gran cantidad de potencia instalada de alrededor de 29 kW en equipos de aires acondicionados, estos a su vez poseen un régimen operativo significativo, el cual en su mayoría se caracteriza por un régimen operativo administrativo, adicionalmente se evidencian equipos de aire acondicionado que se encuentran en régimen operativo continuo para garantizar las condiciones adecuadas en el cuarto de telecomunicaciones, estos factores tienen un efecto directamente sobre el consumo de la energía total de las áreas asociadas al primer piso.

En el primer piso, los computadores poseen un impacto significativo en la demanda de energía, esto se debe a la cantidad de equipos, ya que en el censo de carga hay 124 equipos instalados en los ambientes administrativos y académicos del piso, estos equipos se caracterizan por tener un régimen operativo promedio de 8 horas diarias y una potencia promedio de 250 W, estas características representan una gran concentración de equipos y unas potencias y regímenes operativo considerable, por ende desarrollan un papel importante en el desempeño energético de estos ambientes.

Además se evidenció que la iluminación fluorescente se encuentra dentro de los usos significativos según el diagrama de Pareto de la figura 3.4, esto se

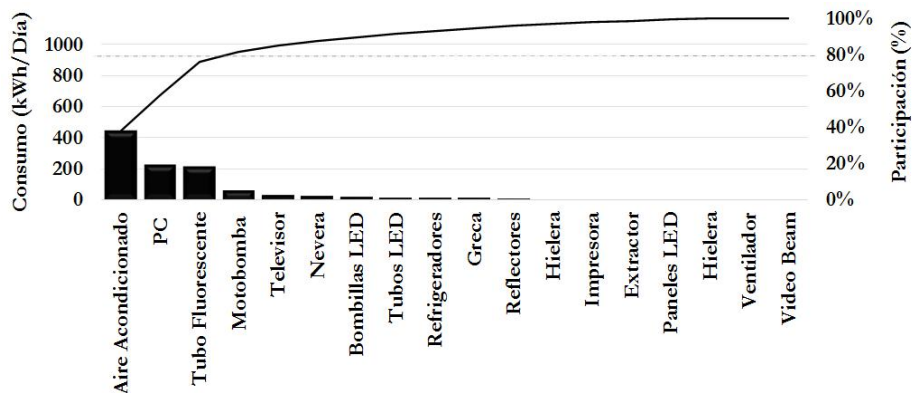


Figura 3.4: Diagrama de Pareto de consumo de energía eléctrica Piso 1.

debe al elevado número de tubos FT8 instalados en los diferentes ambientes, los cuales suman una potencia total instalada de 12 kW, además, este tipo de carga posee un régimen de uso significativo caracterizado por el horario de unas instalaciones administrativas con un promedio de 12 horas al día, debido a las características constructivas de la edificación los tres primeros niveles carecen de entradas de luz natural, lo cual dificulta el aprovechamiento de este valioso recurso y hace que estas cargas sean fijas.

Las características energéticas en los sistemas de iluminación evidencian un enorme potencial de la mejora del desempeño energético, pues el parque de iluminación está constituido en su mayor medida por tubos fluorescentes y lámparas halógenas, esta tecnología posee una menor eficiencia que la tecnología LED.

Una transición tecnológica en el parque de iluminación con respecto a la iluminación fluorescente tendría un potencial de reducir alrededor del 50 % la potencia instalada, lo cual tendría un impacto directo en la demanda de energía, ya que existe en este caso una relación directa con el consumo energético y la potencia instalada, como se ilustra en el figura 3.5, esta relación es de alrededor del 80 %, lo cual permite definir que una transición tecnológica en el parque de iluminación tendría un impacto significativo en la disminución de la demanda asociadas a estos sistemas, además brindaría una mejora del desempeño energético de las instalaciones mejorando la eficiencia de los sistemas de iluminación, y mejorando los niveles de confort de los ocupantes, ya que la iluminación LED proporciona mejores condiciones iluminación en los ambientes.

En la figura 3.5 se evidencia también una correlación entre las variables de consumo de energía y cantidad de equipos, esto se debe a que el consumo de energía varía en función de la cantidad de cargas asociadas por área, aumentando proporcionalmente. Sin embargo, la correlación con del consumo de energía y la potencia instalada es mucho mayor, esto se debe a que en un área puede estar instalado un equipo con una potencia nominal muy grande lo cual tendría mayor impacto en la demanda que una concentración de cargas de menor potencia

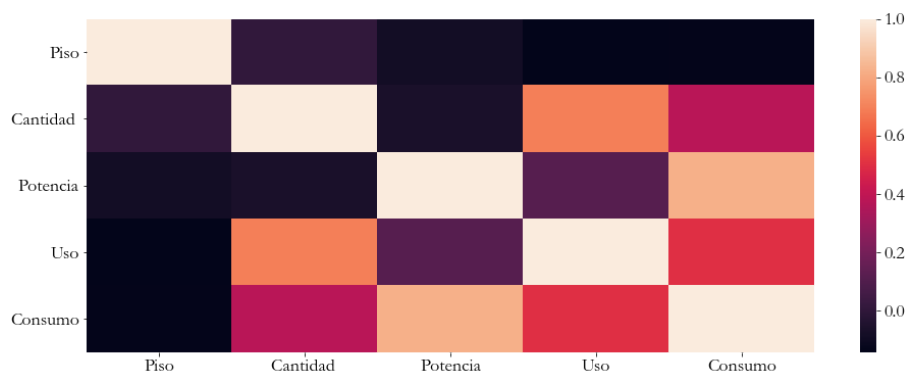


Figura 3.5: Matriz de correlación de las variables de la revisión energética.

nominal, como es el caso de los sistemas de iluminación, los cuales poseen una considerable cantidad de equipos por áreas, pero la suma de sus potencias no logran superar la de los sistemas de aire acondicionado.

En la tabla 3.1 se muestran los equipos con mayor consumo de energía por área, se puede observar también la correlación existente entre régimen de uso de los equipos y el consumo energético, donde en este caso la cantidad de equipos de aire acondicionado en el área de farmacia no posee el mismo impacto en la demanda de energía, como en el caso del consumo de energía del sistema aire acondicionado del cuarto de telecomunicaciones, ya que éste posee un régimen operativo continuo.

Piso	Espacio	Ambiente	Equipo	Cantidad	Potencia [kW]	Uso [h/día]	Consumo [kWh/Día]
1	Curato de Telecomunicaciones	Administrativo	Aire Acondicionado	1	3,5	24	85
4	Cuarto de Telecomunicaciones	Administrativo	Aire Acondicionado	1	3,5	24	85
1	Estética	Aprendizaje	Aire Acondicionado	2	3,5	11	77
1	Farmacia	Aprendizaje	Aire Acondicionado	2	3,5	11	77
2	Administración Educativa	Administrativo	Aire Acondicionado	2	3,5	10	70
1	Cuarto de Bombeo	Administrativo	Moto bomba	1	4,0	16	64
5	Curato de Telecomunicaciones	Administrativo	Aire Acondicionado	1	2,2	24	53
2	AgroTics	Administrativo	PC	17	0,3	10	53
1	Almacén de Comercio	Aprendizaje	Aire Acondicionado	1	4,6	11	52
1	Almacén Agro	Aprendizaje	Aire Acondicionado	1	4,6	11	52

Tabla 3.1: Equipos de mayor consumo de energía

Según la revisión energética el segundo y tercer piso de la edificación, éstos presentan una tendencia energética de consumo muy semejante a las obtenidas

en el primer piso, como se ilustra en las figuras 3.6 y 3.7 correspondientes a los diagramas de Pareto donde se identifican los usos significativos de la energía en estas áreas.

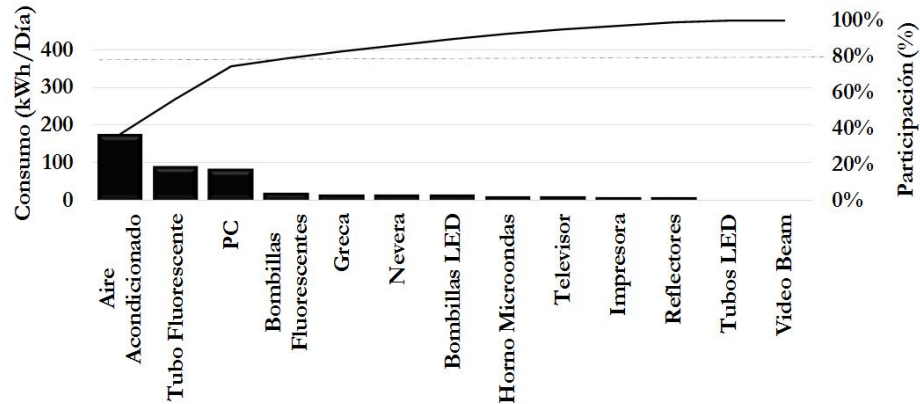


Figura 3.6: Diagrama de Pareto de consumo de energía eléctrica Piso 2.

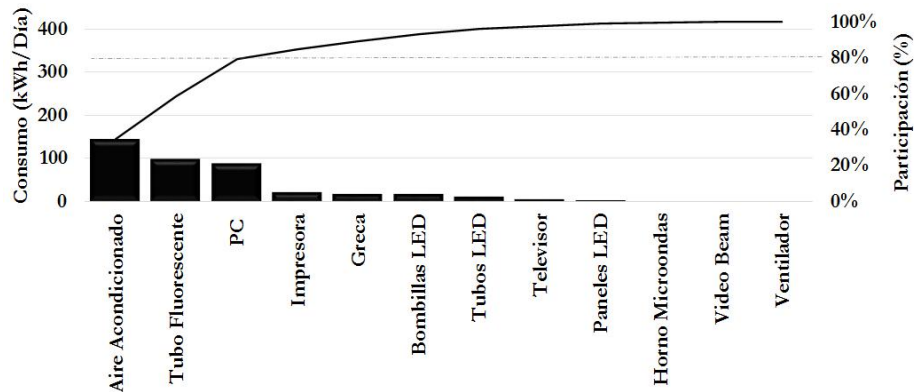


Figura 3.7: Diagrama de Pareto de consumo de energía eléctrica Piso 3.

El mayor impacto en el consumo de energía se debe a los sistemas de aire acondicionado, debido a la potencia instalada y al régimen operativo continuo de los aires acondicionados de los cuartos de telecomunicaciones, los cuales poseen equipos muy sensibles al incremento de la temperatura por lo cual se debe mantener unas condiciones térmicas adecuadas en estos ambientes mediante los sistemas de acondicionamiento térmico.

Los diagramas de Pareto de los pisos dos y tres correspondientes a las figuras 3.6 y 3.7 respectivamente, exhiben que al igual que en el primer piso, las cargas de aire acondicionado poseen el mayor impacto en la demanda energética, sin embargo, se diferencian del Pareto de la figura 3.4 perteneciente al primer piso,

en que a pesar de tener los mismos usos significativos de la energía, estos no poseen el mismo impacto en la demanda, pues en el primer piso la demanda derivada de los sistemas de aire acondicionado es mucho más significativa en comparación con los demás pisos, esto puede deberse, como se determinó en la revisión energética inicial, a la concentración de equipos y la potencia nominal instalada, tal como se muestra en el cuadro 3.2, este comportamiento puede apreciarse mejor en el gráfico 3.8 de intensidad de consumo energético por piso en función de la potencia instalada.

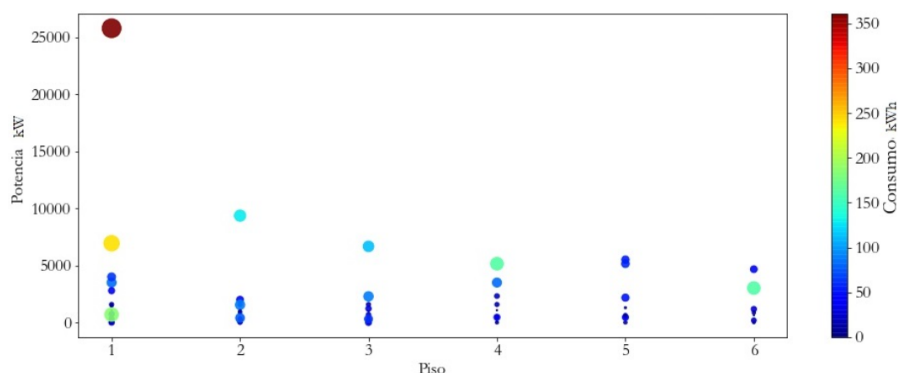


Figura 3.8: Gráfica intensidad de consumo energético en función de potencia instalada.

En los diagramas de Pareto de las figuras 3.9 y 3.11 correspondientes a los pisos 4 y 6 respectivamente, se puede evidenciar que a diferencia de los tres primeros pisos de la edificación el mayor impacto en el desempeño energético se deriva de los computadores, esto se debe a que en estos pisos los equipos poseen una mayor potencia instalada, ya que allí es donde se encuentran más áreas asociadas a los espacios de aprendizaje.

En la figura 3.12 se ilustra la intensidad de consumo de energía eléctrica en función de la cantidad de tipo de cargas por piso, se puede identificar que el mayor impacto en el consumo de energía de la edificación se encuentra en el primer piso, tal como se observa la tabla 3.1.

En la tabla 3.2 de los usos significativos de la energía de la edificación, se puede identificar que en el primer piso el mayor impacto en el desempeño energético se deriva de los sistemas de aire acondicionado, esto se debe a que en este piso se encuentra la mayor concentración de equipos y proporcionalmente una mayor potencia nominal instalada, ya que este piso se caracteriza por tener una gran concentración de espacios administrativos y de aprendizaje.

En el proceso de revisión energética se pudo notar que la participación de los aires acondicionados en la demanda de energía, se debe a dos factores fundamentales, los cuales están directamente relacionados con las condiciones de climatización de éstos. El primer factor es la falta de control sobre la temperatura interior programada, la cual es generalmente demasiado baja, en un rango

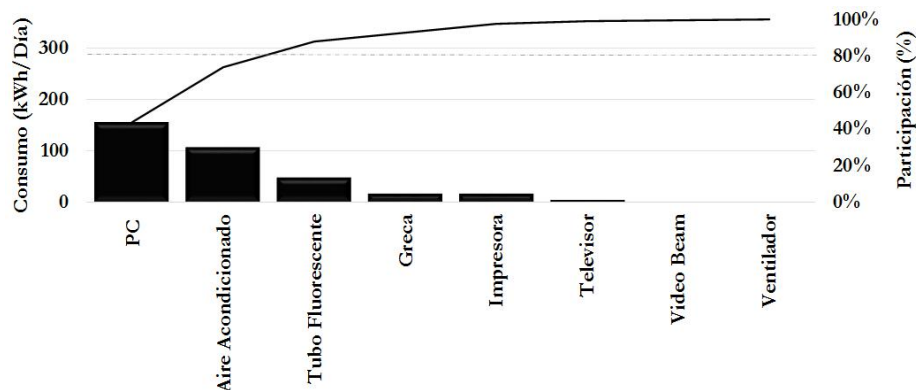


Figura 3.9: Diagrama de Pareto de consumo de energía eléctrica Piso 4.

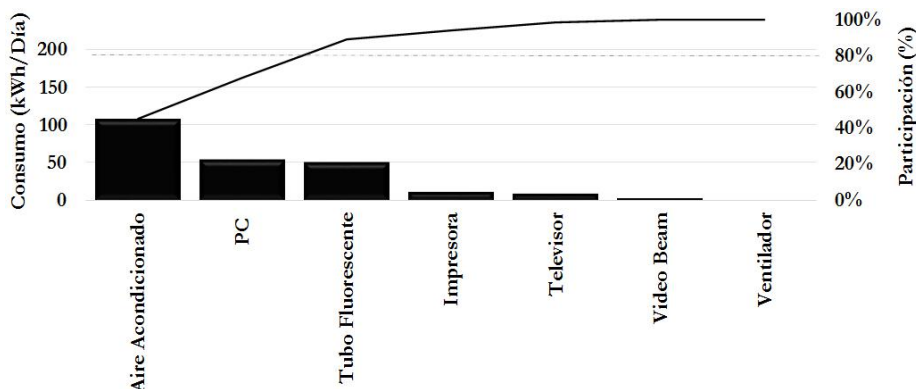


Figura 3.10: Diagrama de Pareto de consumo de energía eléctrica Piso 5.

de 17 a 18 grados Celsius. El segundo factor son las malas prácticas operacionales en el momento de usar dichos equipos, ya que se pudo evidenciar que no se mantienen los ambientes lo más herméticos posible, por lo contrario, se hace uso de los aires acondicionados con las puertas y ventanas abiertas, afectando las condiciones de aislamiento térmico de los ambientes, por ende, los sistemas nunca alcanzan la temperatura interior programada, esto implica que los sistemas trabajan a su capacidad nominal para intentar alcanzar la temperatura deseada.

En conclusión para todos los pisos, en los diagramas de Pareto podemos observar un factor común en los usos significativos de la energía, donde los sistemas de aire acondicionado, computadores e iluminación, caracterizan la mayor parte de la demanda de las instalaciones, tal como se ilustra en la figura 3.13 correspondiente al diagrama de Pareto de consumo de energía eléctrica de la edificación.

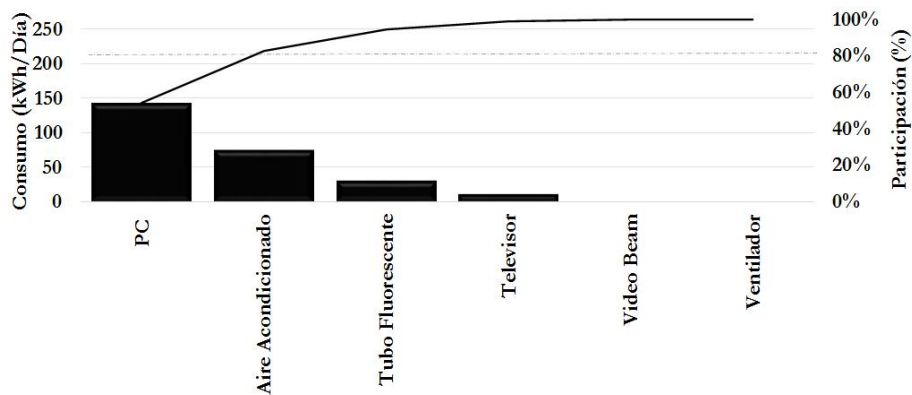


Figura 3.11: Diagrama de Pareto de consumo de energía eléctrica Piso 6.

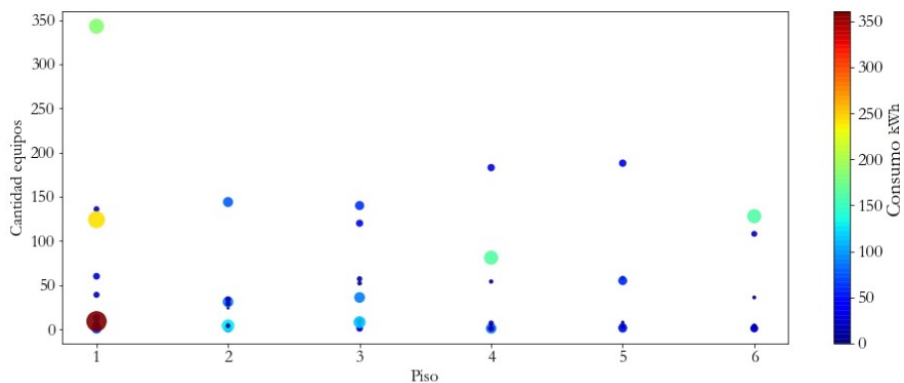


Figura 3.12: Gráfica intensidad de consumo energético.

Con base en los hallazgos y análisis de los datos de la revisión energética, en la siguiente subsección 3.5, se presentan las oportunidades de mejora del desempeño energético, donde el objetivo específico es minimizar los costos de la facturación de energía eléctrica, atenuando el consumo de energía derivada de los usos significativos de la energía.

En la tabla 3.3 se muestra la tecnología, eficiencia y variables que caracterizan los usos significativos de la energía eléctrica, características fundamentales a la hora de definir los planes de acción para la mejora del desempeño energético, en esta tabla se define la eficiencia energética de los equipos de aire acondicionado en kW por toneladas de refrigeración (TR), la eficiencia de los computadores en función de la etiqueta de eficiencia energética la cual posee una escala de letras que van desde la A hasta la G, siendo la A la más eficiente y que tiene cuidado del medio ambiente.

Piso	Equipo	Cantidad	Potencia (kW)	Uso Total (h/Día)	Consumo (kWh/Día)
1	Aire Acondicionado	9	25,7	77	361
1	PC	124	6,9	226	242
1	Tubos Fluorescentes	343	0,7	342	185
4	PC	81	5,1	160	163
6	PC	128	3,0	44	162
2	Aire Acondicionado	4	9,3	30	129
3	Aire Acondicionado	8	6,6	50	114
3	PC	36	2,3	90	90
2	PC	31	1,5	60	89
1	Aire Acondicionado	1	3,5	24	84

Tabla 3.2: Demanda de los usos significativos de la energía eléctrica

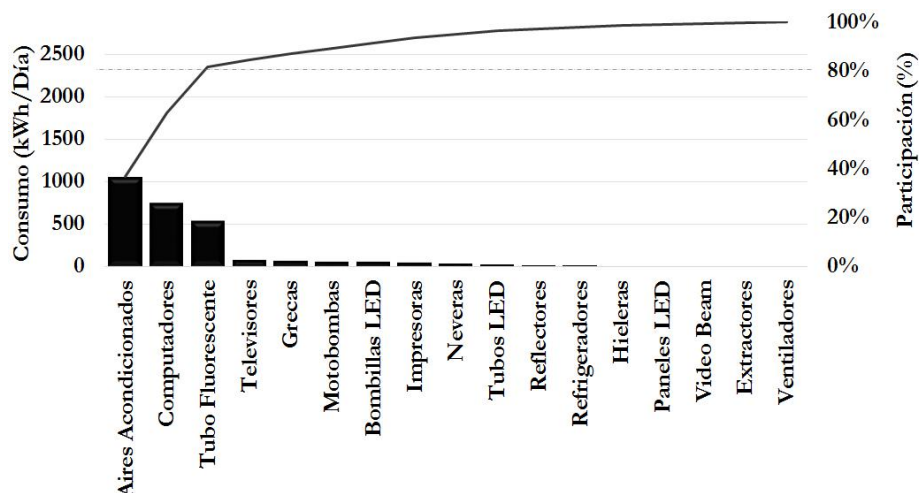


Figura 3.13: Diagrama de Pareto de consumo de energía eléctrica de la edificación.

3.5. Oportunidades de mejora del desempeño energético

Las oportunidades de mejora pueden clasificarse en dos grandes grupos, las que requieren de inversión, habitualmente transiciones tecnológicas de equipos y aquellas que no necesitan una inversión inicial como es el caso de aplicación de buenas prácticas operacionales de los equipos y procesos que caracterizan la instalación, es ahí donde la concientización energética desarrolla un papel muy significativo en la mejora del desempeño energético, pues este tipo de oportunidades de mejora tienen un efecto directo en la manera que las personas usan la energía eléctrica, es decir, que tan eficientemente usan los dispositivos a los

Usos significativos de la energía (USE)	Tecnología	Eficiencia energética	Variables pertinentes
Aire acondicionado	Convencional	[2.2-4.2] [kW/TR]	Aislante de las fachadas
			Mantenimiento
	Inverter	[2.94-3,0] [kW/TR]	Setpoint temperatura Temperatura exterior Temperatura interior Humedad relativa Niveles de ocupación
Computadores	Convencional	[B-D]	Power manager
	Portátil	[A-D]	Condiciones de operación
Iluminación	Fluorescente	[92 lm/W]-[80 lm/W]	Tipo de tecnología
			Características constructivas
	LED	136 lm/W	Régimen de uso Hora del día Niveles de Ocupación

Tabla 3.3: Características de los usos significativos de la energía

cuales tienen acceso, los cuales pueden ser cargas que pertenecen a los usos significativos de la energía, como es el caso de los sistemas *HVAC* y de iluminación de las edificaciones.

Los datos de la revisión energética son de ayuda a la hora de priorizar la implementación de las medidas de ahorro identificadas, es ideal desarrollar el registro de las oportunidades de ahorro, debido a que en el momento de fijar los objetivos y metas energéticas, se reflejan mejor las ideas recopiladas sobre la mejora del desempeño energético.

Las oportunidades de mejora del desempeño energético deben focalizarse en los usos significativos de la energía, por ende, es de vital importancia desarrollar un plan de acción para disminuir el consumo de energía eléctrica demandada por los sistemas de aire acondicionado, ya que dichos equipos encabezan el diagrama de Pareto de los usos significativos de la energía de la edificación, para ello se pretende emplear una serie de algoritmos de optimización convexa tal como se describe en la sección 4, los cuales permitan minimizar los costos energéticos asociados a los usos significativos de la energía eléctrica.

Para abordar el problema de optimización del consumo energético de la edificación, es necesario desarrollar el modelo en función de las características operativas de las cargas, por ende, se divide el algoritmo de optimización en tres partes:

El algoritmo inicia con el modelo de las cargas fijas, donde se caracteriza el consumo de energía de los equipos que debido a su operación o importancia deben funcionar de manera irrestricta, como es el caso de algunos sistemas de iluminación que debido a las características constructivas de la edificación deben estar operando para mantener los niveles de seguridad y confort de los usuarios.

Debido a la peculiaridad de estas cargas, no es posible ejercer un control sobre

<i>Modelo de cargas</i>	
<i>Fijas</i>	Sistemas de iluminación, Motores eléctricos, Sistemas de refrigeración
<i>Desconectables</i>	Computadores
<i>Controlables</i>	Aire acondicionado

Tabla 3.4: Clasificación de los modelos en función de los tipos de cargas

ellas, por ende, este modelo solo permite caracterizar el consumo energético derivado de las cargas fijas. Sin embargo, con el fin de mejorar el desempeño energético, en el modelo se contempla la transición en el parque de iluminación a tecnología LED, lo cual permite hacer gestión energética sobre uno de los usos significativos de la energía eléctrica

En la caracterización energética se evidenció un gran potencial de mejora del desempeño energético en la transición tecnológica del parque de iluminación a tecnología LED, ya que la mayor parte de la iluminación se encuentra constituida por lámparas fluorescentes las cuales tiene un impacto significativo en el desempeño energético debido a sus características técnicas de eficiencia, gran cantidad de dispositivos por área y régimen de uso.

La iluminación tal como se evidencia en el censo de carga siempre tiene un impacto directo en la demanda total de energía de las instalaciones, esto significa que al realizar la transición tecnológica en el parque de iluminación se puede tener un ahorro de energía eléctrica significativo disminuyendo la potencia instalada, debido a que la tecnología LED es más eficiente energéticamente en comparación con la tecnología de iluminación fluorescente.

Además una bombilla fluorescente puede ser reemplazada por una LED de la misma referencia con la mitad de su potencia debido a que las lámparas LED pueden producir más luz por vatio, lo que significa que es mucho más eficiente energéticamente que las lámparas fluorescentes, donde la eficacia luminosa de la lámpara es la relación existente entre el flujo luminoso emitido y la potencia.

Otros aportes de la transición tecnológica en el parque de iluminación es la calidad de la iluminación en los diferentes ambientes que componen la edificación, mejorar el confort lumínico de los ocupantes, lo cual permite mejorar el desempeño energético en las instalaciones y las condiciones operativas en los procesos de aprendizaje y administrativos. Aunque ambos tipos de tecnología de iluminación tienen la capacidad de cumplir con las diversas necesidades de salida de la luz y coloración, las lámparas con tecnología fluorescente poseen recubrimientos de fósforo para mejorar la percepción del color, como fluorescente de espectro completo, que intentan emular la luz del día.

Anteriormente los tubos LED poseían un precio más alto que los fluorescentes, actualmente los precios de ambos dispositivos son cada vez más similares debido a nuevas desarrollos y análisis de costos del ciclo de vida de estos dispositivos, sin embargo, los proyectos de transición tecnológica de eliminación poseen un retorno de la inversión en general menor a dos años. Existen estudios que demuestran que cambiar a LED podría reducir uso de energía hasta un 50 % para los sistemas de iluminación [Morrow, 2018].

En la tabla 3.5 se muestra los resultados del análisis técnico y financiero

Escenario actual						
Ambiente	Tipo de lámpara	Cantidad	Uso día [h]	Potencia total [kW]	Consumo mensual [kWh]	Costos consumo anual [\$]
Formación	Tubo fluorescente T8	319	18	9,5	3445	\$ 20.133.749
	Tubo fluorescente T8	435	7	13	1827	\$ 10.676.988
Administrativo	Tubo fluorescente T8	256	18	7,7	2764	\$ 16.157.491
	Tubo fluorescente T8	260	15	7,8	2340	\$ 13.674.960
	Tubo fluorescente T8	192	7	5,7	806	\$ 4.712.602
Escenario propuesto						
Ambiente	Tipo de lámpara	Cantidad	Uso día [h]	Potencia total [kW]	Consumo mensual [kWh]	Costos consumo anual [\$]
Formación	Tubo LED T8	319	18	4,8	1722	\$ 10.066.874
	Tubo LED T8	435	7	6,5	913	\$ 5.338.494
Administrativo	Tubo LED T8	256	18	3,8	1382	\$ 8.078.764
	Tubo LED T8	260	15	3,9	1170	\$ 6.837.480
	Tubo LED T8	192	7	403	403	\$ 2.356.301
Tiempo de recuperación de la inversión [Meses]						
3,7						

Tabla 3.5: Plan de acción transición tecnológica de iluminación

para la transición tecnológica en el parque de iluminación de la edificación, los cuales se muestran con mayor detalle en los anexos del trabajo, en estos se puede apreciar la considerable cantidad de tubos fluorescentes que caracteriza la iluminación de los diferentes ambientes de la edificación, lo cual hace que la eficiencia en el parque de iluminación sea muy baja, sin embargo, esto indica que el potencial de mejora del desempeño energético es significativo.

Este plan de acción considera un precio promedio de \$ 14.000 pesos, lo que significa una inversión de \$ 20'468.000 para el cambio total de las lámparas a tecnología LED. Desde la perspectiva financiera esta transición tecnológica cuenta con gran potencial de aplicación, ya que un tiempo de recuperación de la inversión de 3,7 meses es muy bueno para apalancar este proyecto, este resultado se debe a la considerable participación que tiene el parque de iluminación en los costos de la energía de la edificación, por ende, al disminuir la potencia instalada se tendrá disminución considerable en los costos de consumo de energía eléctrica.

En segundo lugar el algoritmo modela las cargas desconectables, que caracterizan los equipos que debido a su régimen de uso flexible pueden estar sometidas a desconexiones en ciertos intervalos de tiempo, este modelo se enfoca en la desconexión de equipos de cómputo, los cuales, en el proceso de revisión energética se evidenció que poseen un consumo energético residual de alrededor de un 3 % de su potencia nominal en los momentos en los que no están encendidos.

La desconexión de los equipos de cómputo permite mejorar el desempeño energético de las instalaciones, debido a que los computadores se encuentran catalogados mediante el proceso de revisión energética como usos significativos de la energía.

Finalmente el algoritmo modela la optimización de las cargas controlables, las cuales están enfocadas en los sistemas de aire acondicionado. Éste modelo mediante el control de la temperatura interior en función de las características térmicas de los ambientes permite atenuar el consumo de energía eléctrica de

dichos sistemas, ya que la temperatura interior deseada a la que se programan los diferentes ambientes y sus características térmicas están directamente relacionadas con el consumo de energía eléctrica derivada de estos equipos, tal como se describe en la ecuación 4.6 en el capítulo 4.

Al desarrollar un algoritmo de optimización para los sistemas de aire acondicionado se logra tener un impacto directo y significativo sobre el desempeño energético de la edificación ya que la oportunidad de mejora en cuanto a los consumos de energía de estos sistemas como se ve evidenció en 2.2 es muy significativa.

En este algoritmo se asume la aplicación de buenas prácticas operacionales que permitan usar de manera eficiente los equipos, ya que al momento de poner en marcha los aires acondicionados, los usuarios deben mantener los ambientes lo más herméticos posible, para mejorar las condiciones térmicas y para permitir a los dispositivos alcanzar sus temperaturas programadas.

Estos algoritmos contemplan en su código de desarrollo la demanda convencional de energía de las cargas que los caracterizan, es decir, sin ejercer sobre ellas ningún tipo de control u optimización, permitiendo así definir una línea base de consumo energético convencional, con el fin de dimensionar los ahorros de energía eléctrica derivados de la aplicación de los modelos.

Capítulo 4

Modelos Matemáticos para la Mejora del Desempeño Energético

En este capítulo se describen los modelos matemáticos para las cargas fijas, desconectables y controlables, los cuales están enfocados en minimizar los costos energéticos derivados de los usos significativos de la energía eléctrica, por ende, obtener una mejora del desempeño energético de la edificación.

Los modelos matemáticos utilizan la variación de precios de la energía eléctrica, en este caso se simula esta variación considerando que el mercado eléctrico colombiano requiere una reforma para incluir tarifas horarias a la energía eléctrica, ya que considerando la transición energética a la que pretende llegar el país, el crecimiento de la generación de fuentes no convencionales de energía tiene cada vez mayor impacto en el mercado eléctrico. En la figura 4.1 se muestra los precios considerados para estos modelos, con base en la caracterización de precios horarios de electricidad en Colombia [Gómez Correa,].

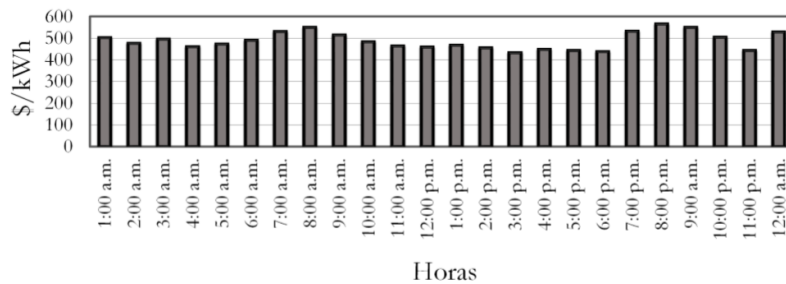


Figura 4.1: Información de precios en tiempo real recibida de la empresa de servicios públicos

Como se mencionó anteriormente, en los siguientes modelos detallados en 4.1, 4.2 y 4.3 está implícito en el código de desarrollo los costos de consumo de energía convencional, lo que permitiría hacer una comparación entre los costos iniciales y los de la energía optimizada.

4.1. Modelo de cargas fijas

Las cargas fijas en tienen como característica específica, que tanto su consumo de energía, como régimen operativo no pueden ser modificados, a su vez, tampoco pueden ser controladas, ya sea por sus características técnicas o por ser una necesidad imprescindible para el usuario.

Este modelo considera la transición energética de tecnología fluorescente a LED, en el parque de iluminación de la edificación, lo que permite disminuir la potencia instalada y proporcionalmente atenuar la demanda de energía de dichas cargas, tal como se propone en el capítulo 3.5.

La ecuación 4.1 hace referencia a la relación entre los costos y la demanda de energía de las cargas fijas para cada intervalo de tiempo, permitiendo obtener el costo de la demanda de energía eléctrica de dichas cargas.

La restricción de la ecuación 4.2, establece el consumo nominal de energía de cada una de las cargas fijas para cada intervalo de tiempo.

$$\sum_{t=1}^{24} \sum_{k=1}^K C_t \cdot E_{k,t}^{\text{fija}} \quad (4.1)$$

sueto a:

$$E_{k,t}^{\text{fija}} \leq E_{k,t}^{\text{nominal}} \quad \forall (t, k), \quad (4.2)$$

en donde:

C_t : costo energía eléctrica en el intervalo t .

$E_{k,t}^{\text{fija}}$: energía fija de la carga k en el intervalo t .

$E_{k,t}^{\text{nominal}}$: energía nominal de la carga k en el intervalo t .

4.2. Modelo de cargas desconectables

Las cargas desconectables tienen como característica que no puede ejercer una acción de control para la energía demandada en su operación, sin embargo, pueden ser desconectadas en caso de ser necesario, en este caso se pretende realizar la desconexión de dichas cargas en los intervalos de tiempo en las que no se hace necesario su operación, esto con el fin de atenuar la demanda de energía en modo de espera y los consumos residuales de energía.

La ecuación 4.3 caracteriza los costos asociados a los consumos de energía eléctrica de las cargas desconectables. Para la desconexión de las n cargas en los intervalos de tiempo t , se relaciona una matriz booleana $H_{t,n}^{\text{desconexión}}$, la cual permite caracterizar la operación e intervalos de tiempo habilitados para la desconexión de las cargas; en este caso cuando $H_{t,n}^{\text{desconexión}}$ es 0 la carga n es desconectada.

$$\sum_{t=1}^{24} \sum_{n=1}^N C_t \cdot E_{t,n}^{\text{desconexión}} \cdot H_{t,n}^{\text{desconexión}} \quad (4.3)$$

sujeto a

$$H_{t,n}^{\text{desconexión}} \in [0, 1] \forall (t, n), \quad (4.4)$$

en donde:

C_t : costo energía eléctrica en el intervalo t .

$H_{t,n}^{\text{desconexión}}$: Define el intervalo t habilitado para la desconexión de la carga n .

$E_{t,n}^{\text{desconexión}}$: Energía de la carga de desconexión n en el intervalo t .

4.3. Modelo de cargas controlables

Los sistemas de aire acondicionado se catalogan dentro de las cargas controlables ya que permite modificar el consumo de energía eléctrica mediante el ajuste en la temperatura interior, la cual está programada dentro de un rango de operación para mantener el confort térmico de los ocupantes de los ambientes.

El funcionamiento de los sistemas de aire acondicionado puede describirse mediante un modelo físico, más precisamente un modelo dinámico lineal el cual expresa la relación entre el consumo de energía, las cualidades deseadas a controlar y otras variables físicas que pueden medirse o estimarse, tal como lo formula el autor en [Li et al., 2011], donde en función de las condiciones térmicas en el ambiente el sistema *HVAC* puede modificar sus parámetros de consumo, por medio de la ecuación 4.6 donde se relaciona el consumo de energía con los parámetros térmicos externos e internos, los cuales caracterizar las condiciones térmicas en el ambiente donde operan los equipos.

Los parámetros que caracterizan las condiciones térmicas de cada uno de los ambientes donde operan los sistemas de aire acondicionado utilizados en este modelo se calculan en función de los datos tomados en el proceso de revisión energética, los valores de dichos parámetros se encuentran detallados en los anexos de este modelo.

En la figura 4.2 se ilustra el comportamiento de la temperatura exterior en un día típico en la ciudad de Pereira, en donde está ubicada la edificación, donde en este caso la temperatura se encuentra en el rango de 17 a 27 grados Celsius.

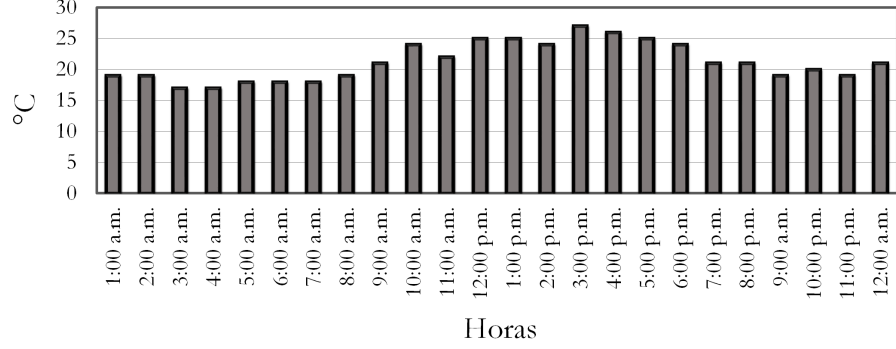


Figura 4.2: Temperatura exterior

La demanda de energía de cada uno de los sistemas de aire acondicionado debe mantenerse dentro del rango de consumo nominal, es por ello que la restricción 4.7 establece los límites de consumo para cada unidad de aire acondicionado a en el intervalo de tiempo t .

Para minimizar el costo económico, se define un rango de operación de la temperatura interior, este rango de temperatura se define en función de la temperatura de confort de los usuarios de la edificación, la restricción 4.8 establece el límite inferior y superior para esta temperatura de confort térmico para cada unidad de aire acondicionado a en el intervalo de tiempo t .

Para definir los intervalos de operación t de cada unidad de aire acondicionado a , se define una matriz booleana $H_{a,t}^{\text{operación}}$, en este caso cuando $H_{a,t}^{\text{operación}}$ es 1 la carga a está habilitada para su operación.

El modelo de optimización para la minimización del costo de energía eléctrica a partir de la programación de la operación de los sistema de aire acondicionado, se describe en la función objetivo 4.5 acompañada del conjunto de restricciones 4.6 a 4.9.

$$\min_{E_{a,t}^{\text{HVAC}}} \sum_{t=1}^{24} \sum_{a=1}^A C_t \cdot E_{a,t}^{\text{HVAC}} \cdot H_{a,t}^{\text{operación}} \quad (4.5)$$

sujeito a:

$$T_{a,t+1}^{\text{int}} - T_{a,t}^{\text{int}} = \alpha_a \cdot (T_{a,t}^{\text{ext}} - T_{a,t}^{\text{int}}) + \beta_a \cdot E_{a,t}^{\text{HVAC}} \quad \forall (t, a), \quad (4.6)$$

$$0 \leq E_{a,t}^{\text{HVAC}} \leq \overline{E_{a,t}^{\text{HVAC}}} \quad \forall (t, a), \quad (4.7)$$

$$\underline{T_{a,t}^{\text{int}}} \leq T_{a,t}^{\text{int}} \leq \overline{T_{a,t}^{\text{int}}} \quad \forall (t, a), \quad (4.8)$$

$$H_{a,t}^{\text{operación}} \in [0, 1] \quad \forall (t, a), \quad (4.9)$$

en donde:

$E_{a,t}^{\text{HVAC}}$: Energía de la unidad térmica. a en el intervalo t .

$T_{a,t}^{\text{int}}$: Temperatura interior del ambiente de operación de la unidad térmica a en el intervalo t .

C_t : costo energía eléctrica en el intervalo t .

$H_{a,t}^{\text{operación}}$: Define el intervalo t habilitado para la operación de la unidad térmica a .

$T_{a,t}^{\text{min}}$: Temperatura interior mínima del ambiente de operación de la unidad térmica a en el intervalo t .

$T_{a,t}^{\text{max}}$: Temperatura interior máxima del ambiente de operación de la unidad térmica a en el intervalo t .

$T_{a,t}^{\text{ext}}$: Temperatura exterior del ambiente de operación de la unidad térmica a en el intervalo t .

β_a : Eficiencia de conversión de la energía térmica de la unidad térmica a .

α_a : Conductividad térmica de la unidad térmica a .

Capítulo 5

Caso de Estudio y Resultados

5.1. Modelo de cargas fijas

En la figura 5.1 se ilustra el impacto en la potencia instalada al realizarse una transición tecnológica en el parque de iluminación de la edificación, esta transición tecnológica esta basada en el cambio de los tubos T8 fluorescentes por tubos T8 LED los cuales poseen una potencia de 15 W.

Al ser la iluminación un uso significativo de la energía, la transición tecnológica de estas cargas tendrá un efecto directo sobre la mejora del desempeño energético, atenuando la demanda de energía y los costos asociados a la operación.

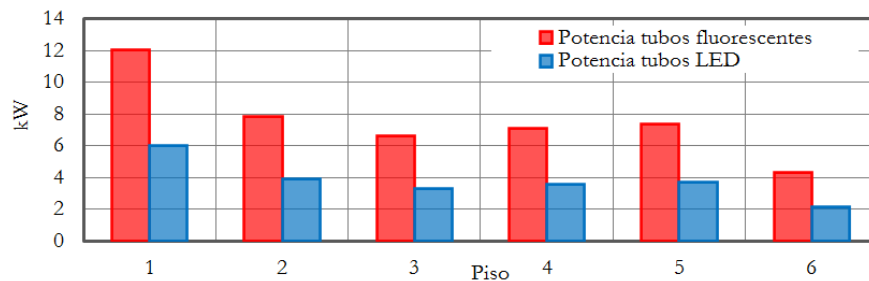


Figura 5.1: Potencia de iluminación fluorescente VS. Potencia de iluminación LED.

La figura 5.2 corresponde a los resultados obtenidos del modelo 4.2 de cargas fijas, se puede observar el impacto que tiene el disminuir la potencia instalada en el parque de iluminación, esto se debe a la relación entre la potencia y el

consumo de energía como muestra la figura 3.5.

Por otra parte, en la figura 5.2 se puede observar el comportamiento de los costos a lo largo del día, donde se identifica que los picos de asociados a la demanda de energía se ven atenuados proporcionalmente, efecto de disminuir la potencia instalada, lo que significa que la relación entre la potencia y el consumo de energía se mantiene a lo largo del horizonte de tiempo.

Los resultados obtenidos ilustrados en la figura 5.2 evidencian que los costos de operación de dichas cargas disminuyen un 25 %, al realizarse la transición tecnológica de iluminación tal como se plantea en el capítulo 3.5, este ahorro porcentual equivale a un ahorro monetario al día de \$ 137.015, lo que a lo largo del horizonte de tiempo de un año significa un gran potencial de ahorro en los costos asociados al consumo de energía eléctrica de las cargas fijas.

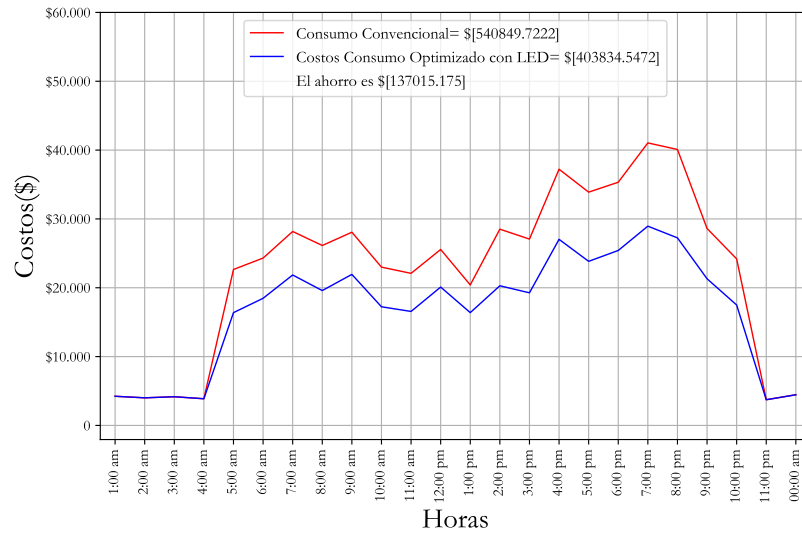


Figura 5.2: Gráfica costos consumos energéticos cargas fijas

5.2. Modelo de cargas desconectables

Los resultados obtenidos en modelo de las cargas desconectables tal como se ilustra en la figura 5.3 muestra un potencial de ahorro en los costos de \$30.326, donde porcentualmente este valor corresponde al 7,8 %, de la demanda de energía al día derivada de los consumos de energía eléctrica residuales de los computadores pertenecientes a los ambientes de aprendizaje y administrativos.

En la figura 5.3 se pueden observar cómo se llevan a cero los costos del consumo de energía de dichas cargas en rangos horarios 8:00 p.m. a 6 a.m.,

los cuales corresponden al periodo de tiempo donde no están en servicio los diferentes ambientes de la edificación.

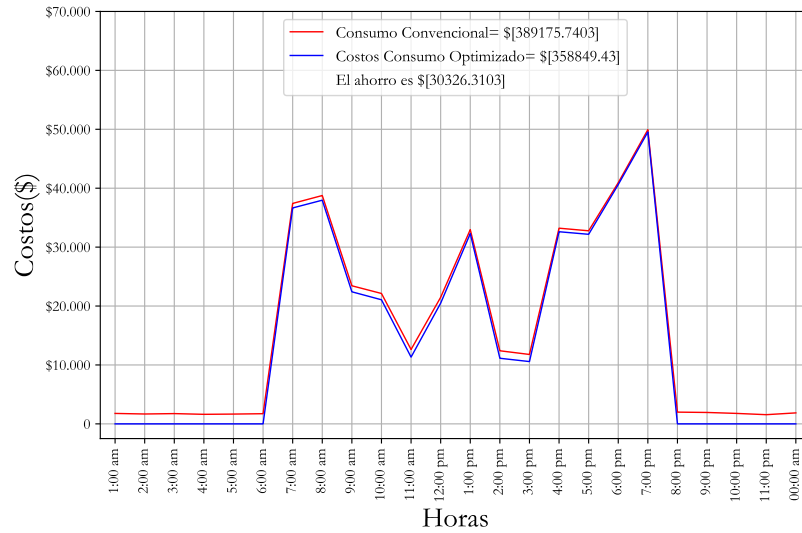


Figura 5.3: Gráfica costos consumos energéticos cargas desconectables

El comportamiento de los costos se reduce en menor medida en el periodo de operación de la edificación, esto se debe a que los ambientes aprendizaje y administrativo están prácticamente en constante funcionamiento.

Es de notar que la curva de los costos tiene la tendencia de la curva de carga de los computadores del ambiente de aprendizaje, tal como se evidencia en la figura 5.4, esto debido a que la edificación cuenta con 455 computadores para la prestación de sus servicios, donde los ambientes de aprendizaje poseen 318, es decir, un 70 % de la potencia instalada de las cargas desconectables.

En conclusión, la desconexión de dichas cargas en sus momentos no operativos, a pesar de individualmente ser poca la carga que estos demandan, con alrededor del 3 % de la potencia nominal de cada equipo, si se toma en consideración la gran cantidad de equipos que están instalados en la edificación, los cuales poseen una potencia nominal instalada de 24,2 kW, y las características operativas de la edificación que se asemeja a las de una edificación comercial donde las horas netas que no están operando al día pueden alrededor de 12 horas, el ahorro derivado de esta desconexión de demandas residuales, tiene un impacto positivo en la mejora del desempeño energético y en la disminución de los costos de energía eléctrica, al considerar un mayor horizonte de tiempo en la aplicación de este modelo matemático.

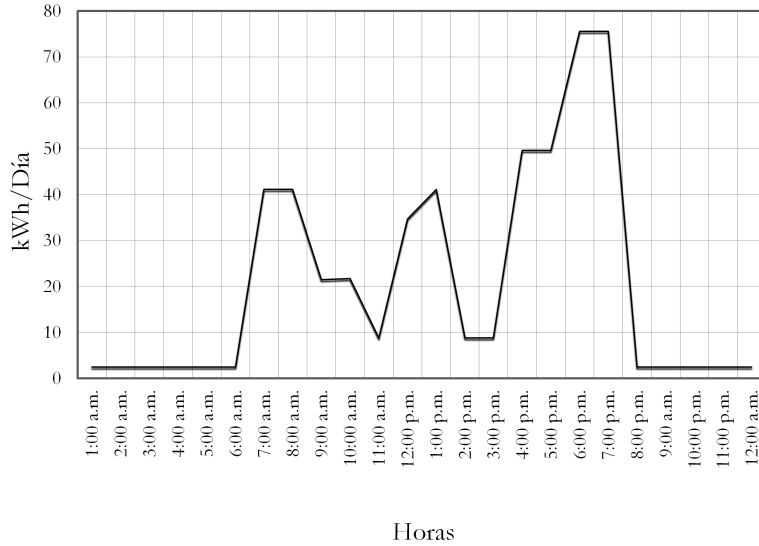


Figura 5.4: Curva de carga computadores de los ambientes de formación

5.3. Modelo de cargas controlables

El modelo de cargas controlables es considerado en este caso como el modelo más importante, debido a que posee el mayor potencial para mejora del desempeño energético de la edificación, ya que éste se enfoca en el mayor uso significativo de la energía eléctrica, por ende, toda gestión energética que se efectúe sobre dichas cargas tendrá un considerable impacto sobre la demanda de energía eléctrica y proporcionalmente sobre los costos asociados a la operación.

En la figura 5.5 se muestra el resultado del control de la temperatura interior, donde la restricción establecida en 4.8, permite operar el sistema dentro de un rango de temperatura de confort térmico para los usuario. En este caso se mantiene la temperatura interior lo más cerca posible a la temperatura exterior, lo que permite optimizar el consumo de energía eléctrica, debido a que reduce la diferencia entre la temperatura exterior y la temperatura dentro del espacio de refrigeración, ya que a mayor diferencia entre dichas temperaturas, el sistema debe demandar una mayor cantidad de energía eléctrica para compensar esta diferencia.

La figura 5.6, describe el comportamiento de los costos de consumo de energía derivada de las cargas controlables, en esta figura se puede apreciar el comportamiento de los costos convencionales de los sistemas de aire acondicionado, esta curva nos muestra un pico sobre las 8:00 a.m. esto se debe a que es el momento donde inicia la jornada operativa en los diferentes ambientes de la edificación, es de notar que los elevados costos de la operación durante toda la jornada,

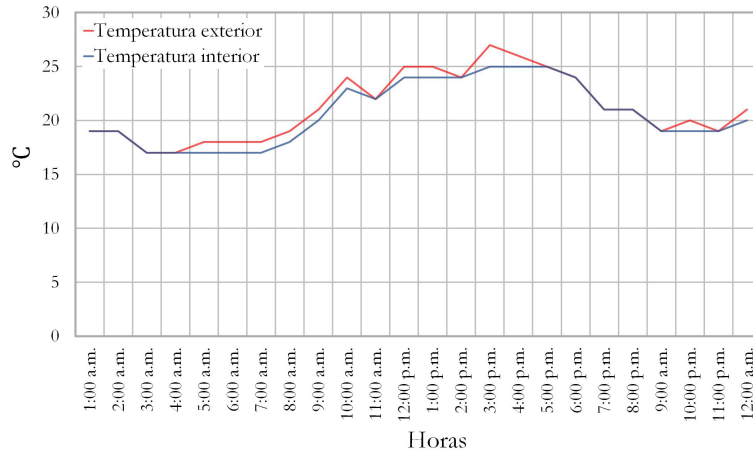


Figura 5.5: Comportamiento del control de temperatura interior

representan un efecto de malas practicas operacionales en los sistemas de aire acondicionado mencionadas anteriormente en el capítulo 3.4, las cuales afectan las condiciones térmicas y operativas de estos equipos, por ende, generan un efecto negativo en el desempeño energético.

La figura 5.6 muestra un pico a las 3:00 p.m. en los costos de la energía optimizada, este comportamiento se debe a la diferencia entre la temperatura de ajuste y la exterior, tal como evidencia en la figura 5.5, lo cual demuestra que a mayor diferencia entre estas temperaturas, mayor es la demanda de energía eléctrica.

En el comportamiento de los costos optimizados se puede apreciar que en algunos intervalos de tiempo el costo se hace cero, esto se debe a que como se observa en la figura 5.5, la temperatura interior requerida en esos intervalos, es menor o igual que la temperatura interior en el intervalo anterior, lo que significa que se aprovecha el volante térmico de los espacios, el cual proporciona una inercia térmica, donde una vez se apaga el sistema, la temperatura varía lentamente en función de las condiciones térmicas y la temperatura exterior, hasta llegar a la temperatura deseada.

En la figura 5.6 se muestran los resultados obtenidos en la optimización de los costos, donde se evidencia el gran potencial de mejora del desempeño energético que se deriva de los sistemas de aire acondicionado, en ésta se puede apreciar que los costos disminuyen significativamente frente a la operación convencional de dichas cargas, este ahorro de \$ 481.572 representa porcentualmente el 95 % de los costos totales, este ahorro se debe no solo a la optimización de los costos de la energía, sino también, a que se asume que los usuarios aplican buenas prácticas operacionales, manteniendo al momento de la operación de los aires acondicionados, los ambientes lo más herméticos posible, esto con el fin de mantener las condiciones térmicas programadas, lo cual crea una gran dife-

rencia entre la operación convencional y la operación propuesta en el modelo matemático, permitiendo así obtener significativos ahorros.

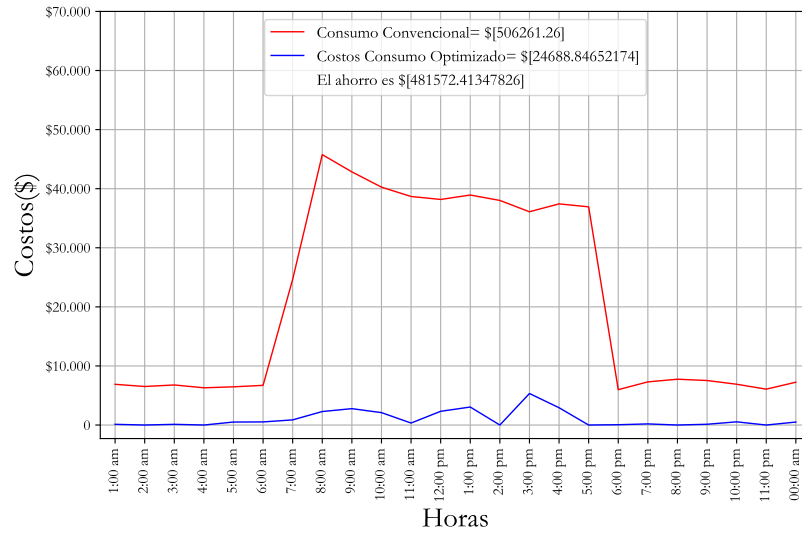


Figura 5.6: Gráfica costos consumos energéticos cargas controlables

5.4. Algoritmo para la mejora del desempeño energético

El algoritmo para la mejora del desempeño energético integra los modelos matemáticos planteados en 4.1, 4.2 y 4.3, permite obtener el resultado conjunto de la aplicación de éstos.

La figura 5.7 ilustra el comportamiento de los costos generales de consumo de energía eléctrica de la edificación, donde se detallan los costos convencionales de la energía eléctrica y los costos obtenidos con el algoritmo de optimización, a su vez muestra el ahorro generado.

Los costos convencionales de la energía eléctrica son de \$ 1'436.286, en el comportamiento de estos costos se observan dos picos, los cuales se deben a que en estas franjas horarias están en operación la mayoría de los equipos que pertenecen a los usos significativos de la energía eléctrica, donde el mayor impacto en la demanda lo poseen los sistemas de aire acondicionado.

Por otro lado, el algoritmo de optimización permite obtener unos costos de energía eléctrica de \$ 787.372, por ende, este algoritmo evidencia excelentes resultados, logrando disminuir el 45 % de los costos de la energía eléctrica, este porcentaje es equivalente a un ahorro diario de \$ 648.913.

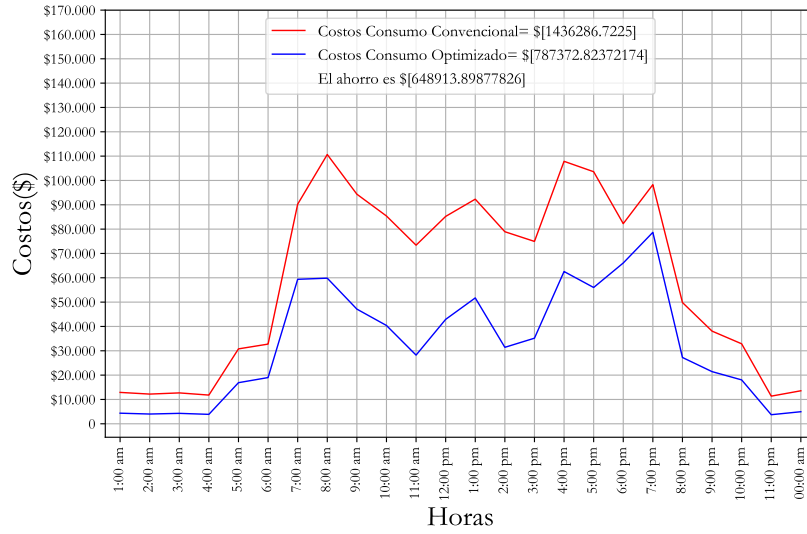


Figura 5.7: Gráfica costos consumos energéticos generales de la edificación

El comportamiento de los costos del algoritmo de optimización permite observar un pico en la franja horaria de las 7:00 p.m. esto se debe a dos factores, el primero es que en este horario se encuentran operando la mayoría de los computadores de los ambientes de aprendizaje, y el segundo factor es que en este horario el comportamiento de los costos de la energía eléctrica es un poco más elevado.

Además el comportamiento de los costos del algoritmo de optimización permite también observar la disminución significativa en los picos de los costos convencionales y los costos de los horarios no operativos de la edificación, gestionando la demanda de los usos significativos de la energía eléctrica durante todo el horizonte de tiempo.

Capítulo 6

Conclusiones

Con base en un proceso de planificación energética se logra mediante la aplicación de la ciencia de datos y la optimización convexa, crear un algoritmo de optimización en función de los usos significativos de la energía eléctrica. En conjunto estos modelos matemáticos permiten aumentar la eficiencia energética en una edificación inteligente.

El estudio evidencia que la ciencia de datos es una herramienta muy útil cuando se usa en conjunto con un proceso de planificación energética para caracterizar y analizar energéticamente una edificación, permitiendo obtener diversidad de resultados estadísticos, los cuales están enfocados a identificar los usos significativos de la energía eléctrica y sus oportunidades de mejora del desempeño energético.

En este documento se demuestra el potencial que posee la optimización convexa en temas relacionados con eficiencia energética, ya que una vez se identifican los usos significativos de la energía y se logra modelar las oportunidades de mejora del desempeño energético, se puede minimizar los costos de energía de una edificación, independientemente de la función que ésta desempeñe.

Cuando los sistemas iluminación hacen parte de los usos significativos de la energía eléctrica de una edificación y éstos se encuentra caracterizados en mayor medida por tecnología ineficiente, la transición tecnológica en el parque de iluminación a tecnología LED permitiría hacer gestión directamente sobre la potencia instalada, la cual posee generalmente una correlación con la demanda de energía, por ende, se genera un impacto positivo en la mejora del desempeño energético y en la disminución de los costos asociados a la operación de dichos sistemas.

La optimización convexa para la gestión energética de los sistemas de aire acondicionado permite obtener una considerable mejora del desempeño energético y ahorros económicos en los costos operativos de una edificación, ya que este tipo de cargas por sus características técnicas y operativas, generalmente se encuentran en los usos significativos de la energía eléctrica.

Bibliografía

- [Agnetis et al., 2011] Agnetis, A., Dellino, G., Detti, P., Innocenti, G., De Pascale, G., and Vicino, A. (2011). Appliance operation scheduling for electricity consumption optimization. In *2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, pages 5899–5904. IEEE.
- [Amini et al., 2015] Amini, M. H., Jaddivada, R., Mishra, S., and Karabasoglu, O. (2015). Distributed security constrained economic dispatch. In *2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT ASIA)*, pages 1–6. IEEE.
- [Arce et al., 2017] Arce, G. et al. (2017). Plan de acción indicativo de eficiencia energética 2017-2022. una realidad y oportunidad para colombia.
- [Attia et al., 2018] Attia, M., Haidar, N., Senouci, S. M., and Aglzim, E. (2018). Towards an efficient energy management to reduce co2emissions and billing cost in smart buildings. In *2018 15th IEEE Annual Consumer Communications Networking Conference (CCNC)*, pages 1–6.
- [Bedoya et al., 2019] Bedoya, J. C., Liu, C.-C., Krishnamoorthy, G., and Dubey, A. (2019). Bilateral electricity market in a distribution system environment. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(6):6701–6713.
- [Bedoya et al., 2020] Bedoya, J. C., Ostadijafari, M., Liu, C.-C., and Dubey, A. (2020). Decentralized transactive energy for flexible resources in distribution systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 12(2):1009–1019.
- [Boyd et al., 2004] Boyd, S., Boyd, S. P., and Vandenberghe, L. (2004). *Convex optimization*. Cambridge university press.
- [Cao and Deng, 2019] Cao, S.-J. and Deng, H.-Y. (2019). Investigation of temperature regulation effects on indoor thermal comfort, air quality, and energy savings toward green residential buildings. *Science and Technology for the Built Environment*, 25(3):309–321.
- [Clastres et al., 2010] Clastres, C., Pham, T. H., Wurtz, F., and Bacha, S. (2010). Ancillary services and optimal household energy management with photovoltaic production. *Energy*, 35(1):55–64.

- [COLOMBIA, 2014] COLOMBIA, C. (2014). Ley 1715 de 2014 diario oficial no. 49.150. *Bogotá, DC: Imprenta Nacional. Retrieved*, 9:2017.
- [Colombia, 2017] Colombia, U. (2017). Ley 1715 de 2014, regulación de la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. 2014.
- [Costa et al., 2013] Costa, A., Keane, M. M., Torrens, J. I., and Corry, E. (2013). Building operation and energy performance: Monitoring, analysis and optimisation toolkit. *Applied Energy*, 101:310–316.
- [Costanzo et al., 2012] Costanzo, G. T., Zhu, G., Anjos, M. F., and Savard, G. (2012). A system architecture for autonomous demand side load management in smart buildings. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4):2157–2165.
- [de Crecimiento Verde, 2018] de Crecimiento Verde, D. P. (2018). Dnp: Bogotá.
- [DNP, 2017] DNP, WORLD BANK GROUP, K. G. G. E. (2017). Energy demand situation in colombia.
- [Georgiou et al., 2019] Georgiou, G. S., Christodoulides, P., and Kalogirou, S. A. (2019). Real-time energy convex optimization, via electrical storage, in buildings—a review. *Renewable energy*.
- [Gómez Correa,] Gómez Correa, E. Caracterización de precios horarios de electricidad en colombia: análisis de las variaciones de los precios y condiciones del mercado debido al fenómeno del niño y otros factores. *Ingeniería de Sistemas e Informática*.
- [Li et al., 2011] Li, N., Chen, L., and Low, S. H. (2011). Optimal demand response based on utility maximization in power networks. In *2011 IEEE power and energy society general meeting*, pages 1–8. IEEE.
- [Ma et al., 2009] Ma, Y., Borrelli, F., Hencsey, B., Packard, A., and Bortoff, S. (2009). Model predictive control of thermal energy storage in building cooling systems. In *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference*, pages 392–397. IEEE.
- [Maasoumy and Sangiovanni-Vincentelli, 2012] Maasoumy, M. and Sangiovanni-Vincentelli, A. (2012). Total and peak energy consumption minimization of building hvac systems using model predictive control. *IEEE Design & Test of Computers*, 29(4):26–35.
- [Morrow, 2018] Morrow, B. L. (2018). The impact of fluorescent and led lighting on student attitudes and behavior in the classroom.
- [of Heating et al., 1989] of Heating, A. S., Refrigerating, Engineers, A.-C., and of North America, I. E. S. (1989). *Energy efficient design of new buildings except low-rise residential buildings*, volume 90. ASHRAE.

- [Olivieri et al., 2014] Olivieri, S. J., Henze, G. P., Corbin, C. D., and Brandemuehl, M. J. (2014). Evaluation of commercial building demand response potential using optimal short-term curtailment of heating, ventilation, and air-conditioning loads. *Journal of Building Performance Simulation*, 7(2):100–118.
- [Omar Prias, 2013] Omar Prias, J. (2013). Implementación de un sistema de gestión de la energía-guia con base en la norma iso 50001.
- [Palensky and Dietrich, 2011] Palensky, P. and Dietrich, D. (2011). Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads. *IEEE transactions on industrial informatics*, 7(3):381–388.
- [Pérez-Lombard et al., 2008] Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., and Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and buildings*, 40(3):394–398.
- [PROURE, 2016] PROURE, P. (2016). Ministerio de minas y energía mme, unidad de planeación minero energética upme, plan de acción indicativo de eficiencia energética 2017-2022, república de colombia.
- [Rijal et al., 2009] Rijal, H. B., Humphreys, M. A., and Nicol, J. F. (2009). Understanding occupant behaviour: the use of controls in mixed-mode office buildings. *Building Research & Information*, 37(4):381–396.
- [Shaw et al., 2005] Shaw, D. et al. (2005). Epa’s 2007 report on the environment: Science report (sab review draft).
- [Stadler et al., 2011] Stadler, M., Siddiqui, A., Marnay, C., Aki, H., and Lai, J. (2011). Control of greenhouse gas emissions by optimal der technology investment and energy management in zero-net-energy buildings. *European Transactions on Electrical Power*, 21(2):1291–1309.
- [Tang and Wang, 2019] Tang, R. and Wang, S. (2019). Model predictive control for thermal energy storage and thermal comfort optimization of building demand response in smart grids. *Applied Energy*, 242:873–882.
- [Tsui and Chan, 2012] Tsui, K. M. and Chan, S.-C. (2012). Demand response optimization for smart home scheduling under real-time pricing. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4):1812–1821.
- [Wei et al., 2014a] Wei, T., Kim, T., Park, S., Zhu, Q., Tan, S. X.-D., Chang, N., Ula, S., and Maasoumy, M. (2014a). Battery management and application for energy-efficient buildings. In *Proceedings of the 51st Annual Design Automation Conference*, pages 1–6.
- [Wei et al., 2014b] Wei, T., Zhu, Q., and Maasoumy, M. (2014b). Co-scheduling of hvac control, ev charging and battery usage for building energy efficiency. In *2014 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD)*, pages 191–196. IEEE.

- [Wei et al., 2016] Wei, T., Zhu, Q., and Yu, N. (2016). Proactive demand participation of smart buildings in smart grid. *IEEE Transactions on Computers*, 65(5):1392–1406.
- [Yang et al., 2021] Yang, S., Wan, M. P., Chen, W., Ng, B. F., and Dubey, S. (2021). Experiment study of machine-learning-based approximate model predictive control for energy-efficient building control. *Applied Energy*, 288:116648.
- [Zanjani et al., 2015] Zanjani, N. A., Lilis, G., Conus, G., and Kayal, M. (2015). Energy book for buildings: Occupants incorporation in energy efficiency of buildings. In *2015 International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems (SMARTGREENS)*, pages 1–6.